

ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE DE SOLUÇÕES AQUOSAS SALINAS EM MATERIAIS POROSOS

JOANA MARIA CARVALHO BENTA DE AZEVEDO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientadora: Professora Doutora Ana Sofia Moreira dos Santos
Guimarães Teixeira

Coorientadora: Doutora Teresa Cláudio Diaz Gonçalves

JULHO DE 2013

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

FCT

Fundação para a Ciência e a Tecnologia
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CIÊNCIA

Esta dissertação foi realizada no âmbito do projeto de investigação DRYMASS (ref. PTDC/ECM/100553/2008) que é financiado por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino.”

Leonardo da Vinci

AGRADECIMENTOS

Ao terminar esta dissertação quero manifestar o meu sincero agradecimento a todos os que contribuíram para a sua concretização, não podendo deixar de salientar as pessoas que tiveram um papel primordial na sua realização:

À Professora Doutora Ana Sofia Guimarães, orientadora deste projeto, pela oportunidade que me deu, pela simpatia e disponibilidade manifestadas desde o início, assim como pelo apoio científico prestado e estímulo permanente.

À Doutora Teresa Diaz Gonçalves, coorientadora deste projeto, pela disponibilidade e acompanhamento constante apesar da distância, e também pelo apoio científico e disponibilização de bibliografia.

Ao Doutor João Delgado e à Professora Doutora Manuela Vilarinho, pela ajuda na compreensão de conceitos da Química, fundamentais na realização deste projeto, assim como na pesquisa bibliográfica.

Ao Professor Nuno Ramos e ao Engenheiro Pedro Pereira, pelo apoio prestado na utilização do Laboratório de Física das Construções.

Aos meus colegas, Mariana e Tiago, pelo companheirismo e entajuda durante a realização do trabalho laboratorial.

Ao Engenheiro Eduardo Costa e à Engenheira Cláudia Ferreira pela simpatia, ajuda e disponibilidade nos momentos passados no laboratório.

Ao Técnico José Costa, do Núcleo de Betão, Pedra e Cerâmica do Departamento de Materiais do LNEC, pelo corte dos provetes provenientes de blocos de tijolo.

À Engenheira Vânia Brito, por me transmitir conhecimentos relativos à metodologia experimental do ensaio de absorção capilar.

Aos meus pais, por todos os ensinamentos e valores de coragem, trabalho e perseverança que me transmitiram ao longo de toda a minha caminhada.

À minha irmã, pela companhia nas várias horas passadas a redigir este trabalho.

Ao Richard, pelo apoio incondicional e encorajamento, fundamentais ao longo de todo este percurso académico e na elaboração desta dissertação.

À minha família, por todo o apoio e incentivo durante este percurso académico.

À Marta, Sara e Sofia, pela amizade, pelo apoio e pelos bons momentos que passamos juntas.

RESUMO

A ação dos sais solúveis e umidade nos edifícios antigos é uma causa frequente da sua degradação. Pretende-se com este trabalho estudar experimentalmente, através de ensaios laboratoriais, de que forma diferentes tipos de sais dissolvidos em água influenciam a absorção por capilaridade em materiais porosos. O levantamento do estado da arte incidiu sobre a ação de degradação dos sais solúveis sobre os materiais porosos, sobre as características dos materiais porosos e foca também os mecanismos de transporte da água, no estado líquido e de vapor, envolvidos nos processos de absorção capilar e secagem.

A campanha experimental realizada incluiu o ensaio de absorção por capilaridade e o ensaio de secagem. Os materiais porosos utilizados foram o tijolo e a argamassa e utilizaram-se seis soluções salinas, de concentração saturada: cloreto de sódio, sulfato de sódio, cloreto de potássio, nitrato de sódio, nitrato de potássio e carbonato de sódio. Realizaram-se os mesmos ensaios com água, que serviram como referência.

Esta dissertação permitiu tirar conclusões sobre: i) a influência dos sais na absorção por capilaridade; ii) processos de degradação, influência dos sais solúveis na secagem de materiais porosos; iii) a correlação existente entre a degradação dos materiais porosos com o tipo de sal.

PALAVRAS-CHAVE: sais solúveis, materiais porosos, absorção capilar, secagem, degradação.

ABSTRACT

Salt damp is one of the most frequent causes of the old buildings' decay. The aim of this thesis was to study experimentally, throughout laboratory tests, how different types of soluble salts dissolved in water influenced the capillary absorption in porous building materials. The state of art has focused on the effect of soluble salts on the decay of porous materials and also on the mechanisms of water transport, liquid and vapour, involved in the capillary absorption and drying.

The carried out experimental work included the capillarity absorption and drying tests. The porous building materials used were brick and lime mortar, and the salt solutions used, at saturated concentration, were sodium chloride, sodium sulphate, potassium chloride, sodium nitrate, potassium nitrate and sodium carbonate. These tests were performed also with water, which was used as a reference.

This dissertation leads to some conclusions: i) the influence of soluble salts in the capillary absorption; ii) the salt decay and the influence of soluble salts on the drying of porous materials; iii) a correlation between degradation of porous materials with the type of soluble salt.

KEYWORDS: soluble salts, porous materials, capillary absorption, drying, salt damp.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. ÂMBITO E OBJETIVOS	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2 AÇÃO DOS SAIS E HUMIDADE NOS EDIFÍCIOS	3
2.1. Os SAIS SOLÚVEIS E A SUA AÇÃO NOS MATERIAIS POROSOS DE CONSTRUÇÃO	3
2.1.1. INTRODUÇÃO	3
2.1.2. SAIS SOLÚVEIS	4
2.1.3. POROSIDADE E HIGROSCOPICIDADE	7
2.1.4. A DEGRADAÇÃO POR SAIS SOLÚVEIS	9
2.2. TRANSPORTE DE HUMIDADE E SECAGEM: MECANISMOS FÍSICOS	11
2.2.1. TRANSPORTE LÍQUIDO	11
2.2.2. TRANSPORTE NA FASE DE VAPOR	13
2.2.3. SECAGEM	15
2.3. ESTUDOS ANTERIORES SOBRE INFLUÊNCIA DOS SAIS SOLÚVEIS EM MATERIAIS POROSOS	17
2.3.1. CONTRIBUTO DOS ESTUDOS ANTERIORES	17
2.3.2. CONTRIBUTO DO PRESENTE ESTUDO	19
2.4. SÍNTESE DO CAPÍTULO	19
3 ANÁLISE EXPERIMENTAL DA CAPILARIDADE E DA SECAGEM DE DOIS MATERIAIS POROSOS EM PRESENÇA DE SAIS SOLÚVEIS	23
3.1. INTRODUÇÃO	23
3.2. MATERIAIS UTILIZADOS	23
3.3. ENSAIO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE	26
3.3.1. MÉTODO DE ENSAIO	26
3.3.2. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	28
3.3.2.1 Coeficiente de Absorção por Capilaridade	28
3.3.2.2 Sorvidade	40
3.4. ENSAIO DE SECAGEM	42

3.4.1. MÉTODO DE ENSAIO.....	42
3.4.2. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	44
3.4.2.2 Cálculo do índice de secagem.....	52
3.5. ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS	56
3.5.1. INFLUÊNCIA DOS SAIS NO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO CAPILAR	56
3.5.2. RELAÇÃO ENTRE A DEGRADAÇÃO DO MATERIAL COM O TIPO DE SAL.....	57
3.5.3. INFLUÊNCIA DOS SAIS NA CINÉTICA DE SECAGEM	59
3.6. SÍNTESE DO CAPÍTULO	60
4 CONCLUSÃO.....	63
4.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
4.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	64
BIBLIOGRAFIA.....	67
ANEXO 1	71
ANEXO 2	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Cristais de Nitrato de Potássio.....	5
Figura 2.2 – Diagrama de fase NaCl [3].....	6
Figura 2.3 – Diagrama de fase Na ₂ SO ₄ [3] [10]	6
Figura 2.4 – Porosidade Aberta. [15]	8
Figura 2.5 – Porosidade Fechada. [15].....	8
Figura 2.6 – Higroscopicidade [15].	8
Figura 2.7 Exemplos da degradação por sais em edifícios [3].	9
Figura 2.8 – Degradação por ação dos sais. [4]	10
Figura 2.9 – O fenómeno da capilaridade [15].....	12
Figura 2.10 – Ângulos de contato para materiais hidrófilos e hidrófugos [21].	12
Figura 2.11 – Ensaio de Absorção por capilaridade (adaptado [3]).....	13
Figura 2.12 – Curva típica de absorção por capilaridade de um material poroso.....	13
Figura 2.13 – Ensaio de permeabilidade ao vapor de água, método da “tina húmida”, adaptado [21].	14
Figura 2.14 – Fases do processo de secagem, adaptado [3]	15
Figura 2.15 – Curva típica de secagem, adaptado [3].	16
Figura 3.1 – Tijolo Cerâmico na máquina de corte no LNEC.....	24
Figura 3.2 – Provete de argamassa de cal aérea	24
Figura 3.3 a) e b)– Aplicação da resina impermeabilizante nos provetes de tijolo e de argamassa. ..	25
Figura 3.4 – Agitador magnético com regulador de temperatura com solução supersaturada de Na ₂ SO ₄	26
Figura 3.5 – Filtração da solução sobressaturada de Na ₂ SO ₄	26
Figura 3.6 – Provetes dentro da estufa ventilada.	27
Figura 3.7 – Ensaio de Absorção por Capilaridade a decorrer dentro de uma caixa de plástico fechada.	27
Figura 3.8 – Curvas de absorção capilar dos provetes de tijolo, imersos parcialmente em água.....	28
Figura 3.9 –Curvas de absorção capilar dos provetes de tijolo, imersos parcialmente em solução aquosa de cloreto de sódio.	29
Figura 3.10 –Curvas de absorção capilar dos provetes de tijolo, imersos parcialmente em solução aquosa de sulfato de sódio.	30
Figura 3.11 –Curvas de absorção capilar dos provetes de tijolo, imersos parcialmente em solução aquosa de cloreto de potássio.	31
Figura 3.12 –Curvas de absorção capilar dos provetes de tijolo, imersos parcialmente em solução aquosa de nitrato de sódio.....	31

Figura 3.13 –Curvas de Absorção Capilar dos provetes de tijolo, imersos parcialmente em solução aquosa de nitrato de potássio.	32
Figura 3.14 –Curvas de Absorção Capilar dos provetes de tijolo, imersos parcialmente em solução aquosa de carbonato de sódio.	33
Figura 3.15 –Média e desvio padrão do coeficiente de capilaridade para cada solução no Tijolo	34
Figura 3.16 –Curvas de absorção capilar dos provetes de argamassa, imersos parcialmente em água.	34
Figura 3.17 –Curvas de absorção capilar dos provetes de argamassa, imersos parcialmente na Solução aquosa cloreto de sódio.	35
Figura 3.18 –Curvas de absorção capilar dos provetes de argamassa, imersos parcialmente na solução aquosa sulfato de sódio.	36
Figura 3.19 –Curvas de absorção capilar dos provetes de argamassa, imersos parcialmente na solução aquosa cloreto de potássio.	36
Figura 3.20 –Curvas de absorção capilar dos provetes de argamassa, imersos parcialmente na solução aquosa nitrato de sódio.	37
Figura 3.21 –Curvas de absorção capilar dos provetes de argamassa, imersos parcialmente na solução aquosa nitrato de potássio.	38
Figura 3.22 –Curvas de absorção capilar dos provetes de argamassa, imersos parcialmente na solução aquosa carbonato de sódio	39
Figura 3.23 – Média e desvio padrão do coeficiente de capilaridade para cada solução na argamassa	40
Figura 3.24 –Sorvidade representada em função de $(\sigma/\eta)^{1/2}$, com valores corrigidos	41
Figura 3.25 –Sorvidade representada em função de $(\sigma/\eta)^{1/2}$, com valores corrigidos	42
Figura 3.26 – Provete de argamassa de cal aérea imerso na solução de carbonato de sódio degradado durante a segunda semana de secagem.	43
Figura 3.27 –Selagem da base dos provetes com folha de polietileno.	43
Figura 3.28 –Ensaio de Secagem	44
Figura 3.29 –Curvas de secagem dos provetes de tijolo imersos em água.	45
Figura 3.30 –Curvas de secagem dos provetes de argamassa imersos em água.	45
Figura 3.31 –Pormenor da secagem dos provetes de argamassa e tijolo imersos em água, 11ª semana de secagem.	45
Figura 3.32 –Curvas de secagem dos provetes de tijolo imersos em solução aquosa de cloreto de sódio.	46
Figura 3.33 –Curvas de secagem dos provetes de argamassa imersos em solução aquosa de cloreto de sódio.	46
Figura 3.34 –Pormenor da secagem dos provetes de argamassa e tijolo imersos em solução aquosa de cloreto de sódio, 11ª semana de secagem.	46

Figura 3.35 –Curvas de secagem dos provetes de tijolo imersos em solução aquosa de sulfato de sódio.....	47
Figura 3.36 –Curvas de secagem dos provetes de argamassa imersos em solução aquosa de sulfato de sódio.....	47
Figura 3.37 –Pormenor da secagem dos provetes de argamassa e tijolo imersos em solução aquosa de sulfato de sódio, 10ª semana de secagem.	47
Figura 3.38 –Curvas de secagem dos provetes de tijolo imersos em solução aquosa de cloreto de potássio.....	48
Figura 3.39 –Curvas de secagem dos provetes de argamassa imersos em solução aquosa de cloreto de potássio.....	48
Figura 3.40 –Pormenor da secagem dos provetes de argamassa e tijolo imersos em solução aquosa de cloreto de potássio, 10ª semana de secagem.	48
Figura 3.41 –Curvas de secagem dos provetes de tijolo imersos em solução aquosa de nitrato de sódio.....	49
Figura 3.42 –Curvas de secagem dos provetes de argamassa imersos em solução aquosa de nitrato de sódio.....	49
Figura 3.43 –Pormenor dos provetes de argamassa e tijolo imersos em solução aquosa de nitrato de sódio, 9ª semana de secagem.	49
Figura 3.44 –Curvas de secagem de tijolo dos provetes imersos em solução aquosa de nitrato de potássio.....	50
Figura 3.45 –Curvas de secagem dos provetes de argamassa imersos em solução aquosa de nitrato de potássio.....	50
Figura 3.46 –Pormenor dos provetes de argamassa e tijolo imersos em solução aquosa de nitrato de potássio, 9ª semana de secagem.	50
Figura 3.47 –Curvas de secagem dos provetes de tijolo imersos em solução aquosa de carbonato de sódio.....	51
Figura 3.48 –Curvas de secagem dos provetes de argamassa imersos em solução aquosa de carbonato de sódio.....	51
Figura 3.49 –Pormenor da secagem dos provetes de argamassa e tijolo imersos em solução aquosa de carbonato de sódio, 9ª semana de secagem.	51
Figura 3.50 –Relação entre áreas no cálculo do índice de secagem.	52
Figura 3.51 – Índice de secagem médio e respetivo desvio padrão, do tijolo para cada solução salina.	55
Figura 3.52 – Índice de secagem médio e respetivo desvio padrão, da argamassa para cada solução salina.	55
Figura 3.53 –Sorvidade representada em função de $(\sigma/\eta)^{1/2}$ para: a) Pedra de Ançã; b) calcário cinza; c) arenito Bentheimer [29]	57
Figura 3.54 – Degradação do provete A4.2 , eflorescências tipo 'bigodes de gato'.	58
Figura 3.55 – Degradação do provete T6.2 , eflorescência tipo algodão.	58

Figura 3.56 – Degradação do provete A6.2 , nódulos tipo couve flor	58
Figura 3.57 – Coeficiente de Capilaridade médio e respetivo desvio padrão, do tijolo e da argamassa para cada solução salina.	61
Figura 3.58 – Coeficiente de Capilaridade médio e respetivo desvio padrão, do tijolo e da argamassa para cada solução salina.	61
Figura 3.58 – Índice de secagem médio e respetivo desvio padrão, do tijolo e da argamassa para cada solução salina.....	62

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais características de alguns sais, adaptado [3] [7].	4
Tabela 2.2 – Resumo dos estudos anteriores sobre absorção capilar em materiais porosos.	21
Tabela 3.1 – Propriedades das soluções, a 20°C.	25
Tabela 3.2 – Coeficientes de capilaridade do tijolo, imerso parcialmente em água.	29
Tabela 3.3 – Coeficiente de Capilaridade do Tijolo, imerso parcialmente em solução aquosa de cloreto de sódio.	29
Tabela 3.4 – Coeficiente de Capilaridade do Tijolo, imerso parcialmente em solução aquosa de sulfato de sódio.	30
Tabela 3.5 – Coeficiente de capilaridade do tijolo, imerso parcialmente em solução aquosa de cloreto de potássio.	31
Tabela 3.6 – Coeficiente de capilaridade do tijolo, imerso parcialmente em solução aquosa de nitrato de sódio.	32
Tabela 3.7 – Coeficiente de Capilaridade do Tijolo, imerso parcialmente em solução aquosa de nitrato de potássio.	32
Tabela 3.8 – Coeficiente de Capilaridade do Tijolo, imerso parcialmente em solução aquosa de carbonato de sódio.	33
Tabela 3.9 – Coeficiente de capilaridade dos provetes de argamassa, imersos parcialmente em água.	34
Tabela 3.10 – Coeficiente de capilaridade dos provetes de argamassa, imersos parcialmente na solução aquosa de cloreto de sódio.	35
Tabela 3.11 – Coeficiente de capilaridade dos provetes de argamassa, imersos parcialmente na solução aquosa de sulfato de sódio.	36
Tabela 3.12 – Coeficiente de capilaridade dos provetes de argamassa, imersos parcialmente na solução aquosa de cloreto de potássio.	37
Tabela 3.13 – Coeficiente de capilaridade dos provetes de argamassa, imersos parcialmente na solução aquosa de nitrato de sódio.	38
Tabela 3.14 – Coeficiente de capilaridade dos provetes de argamassa, imersos parcialmente na solução aquosa de nitrato de potássio.	38
Tabela 3.15 – Coeficiente de capilaridade dos provetes de argamassa, imersos parcialmente na solução aquosa de carbonato de sódio.	39
Tabela 3.16 – Sorvidade do Tijolo em relação à água e às soluções salinas.	41
Tabela 3.17 – Sorvidade da Argamassa em relação à água e às soluções salinas.	42
Tabela 3.18 – Tempos de secagem, em horas, dos provetes de argamassa e tijolo no ensaio com água.	53
Tabela 3.19 – Índice de secagem dos provetes.	54
Tabela 3.20 – Valores resumo do coeficiente de capilaridade médio dos provetes de argamassa e tijolo.	60

Tabela 3.21 – Valores resumo do índice de secagem médio dos provetes de argamassa e tijolo.62

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

ε - Porosidade de um material

σ – tensão superficial do líquido

η – viscosidade dinâmica da água

ρ – densidade da água

Π – Permeabilidade ao vapor de água (de um material poroso)

Δp – pressão de cristalização

θ - ângulo de contacto

B - coeficiente de penetração capilar

C - coeficiente de absorção de água por capilaridade

C_s - concentração da solução na saturação

C_v – concentração de vapor de água

D_v – coeficiente de difusão (de vapor de água num material poroso)

H – altura da ascensão capilar

j – fluxo de vapor (que atravessa um material poroso)

M_w – massa molar da água

p_c – capilaridade, força de sucção

p_v – pressão parcial de vapor de água no ar

p_{vi} , p_{ve} – pressão parcial de vapor de água no ar , dos dois lados (interior e exterior) de um dado elemento

r – raio capilar

R – constante dos gases perfeitos ($8.3145 \text{ MPa} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

S- sorvidade de um material poroso

t – tempo

T- Temperatura

V_a – Volume de vazios

V_c – Volume molar do sal no estado sólido

V_i – Volume da fase líquida

V_t – Volume total

W – massa de água total absorvida

W_i – teor de água (contido num material poroso)

W_0 – teor de água inicial

H.R. – Humidade Relativa do ar

$H.R._{eq}^{sat}$ – Humidade Relativa de equilíbrio de um sal

$H.R._{eq}$ – Humidade Relativa de equilíbrio

I.S. – Índice de Secagem

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A ação dos sais solúveis é uma das principais causas de degradação dos edifícios anteriores à utilização do betão armado, que se designam edifícios antigos. O betão armado marcou uma nova era na construção, e daí que todos os edifícios construídos antes desse período obedecem a um padrão construtivo comum, em que se utilizavam as mesmas tecnologias e materiais sem grandes variações [1]. Estes edifícios são maioritariamente constituídos por materiais porosos como a pedra, as argamassas de cal e o tijolo cerâmico que permitem a penetração das soluções salinas e os consequentes processos de degradação. Assim, este tema tem especial importância no âmbito da conservação e reabilitação dos edifícios antigos.

Os sais podem ter várias origens, tanto no ambiente que envolve o edifício como nos próprios materiais de construção que o constituem. A degradação que estes sais causam resulta da conjugação de vários fatores: a presença de sais solúveis e água no interior de materiais de construção porosos e a existência de condições ambiente propícias à degradação. Os sais solúveis, por si só, são inofensivos mas, na presença de água, dissolvem-se e formam soluções que circulam na rede porosa dos materiais. Dependendo das condições de humidade relativa e de temperatura, as soluções aquosas salinas podem cristalizar, devido à evaporação do solvente, ou dissolver-se [2]. A oscilação das condições ambientes gera ciclos de recristalização/dissolução que levam à deterioração dos materiais, causando degradação estética, perda de material histórico e, por vezes, sérios problemas de estabilidade provocados pela diminuição da resistência mecânica dos materiais e dos elementos construtivos [3]. O tipo de degradação, e a sua intensidade, depende das condições ambientes a que estão sujeitos os materiais porosos.

Tanto a absorção capilar de soluções aquosas salinas como a secagem dos elementos construtivos contaminados com sais envolvem mecanismos complexos de transporte de água, no estado líquido ou de vapor. É fundamental a sua compreensão uma vez que ainda hoje, apesar do grande investimento em estudos nos últimos tempos, os processos que dão origem à degradação por ação sais solúveis não estão totalmente compreendidos e não existe um consenso entre a comunidade científica em relação a diversos aspetos. Uma das razões é o facto de este tema reunir conhecimentos de várias áreas como a química, a física e a engenharia civil no âmbito dos materiais de construção e da patologia e reabilitação de edifícios.

Este estudo baseia-se fundamentalmente numa campanha experimental em que se determinou a curva de absorção por capilaridade e a curva de secagem de materiais porosos na presença de soluções aquosas salinas. Pretende contribuir para uma melhor compreensão do comportamento dos materiais porosos face à presença dos sais no seu interior, tal como caracterizar as alvenarias dos edifícios antigos contaminadas por sais.

1.2. ÂMBITO E OBJETIVOS

Com o objetivo de contribuir para o avanço do conhecimento no âmbito da degradação dos edifícios por ação dos sais solúveis, esta dissertação procurou avaliar a influência de vários sais solúveis na absorção capilar e na secagem de dois materiais porosos representativos dos correntes em edifícios antigos. Os objetivos específicos do estudo são os seguintes:

- Compreender a patologia dos sais solúveis em edifícios antigos, com base num levantamento do estado-da-arte na matéria;
- Por meio de ensaios realizados sob condições controladas:
 - Analisar a forma como diferentes tipos de sais influenciam a absorção por capilaridade dos dois materiais selecionados, argamassa e tijolo;
 - Analisar a influência desses sais na secagem subsequente à absorção capilar;
 - Examinar a possível ocorrência de degradação dos materiais durante a secagem, devido à cristalização dos sais, e discutir a sua relação com o tipo de sal.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação divide-se em quatro capítulos, sendo o presente capítulo introdutório, onde se enquadra o tema, se descreve o âmbito e objetivos e se apresenta a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo, sobre a ação dos sais e da humidade nos edifícios, abordam-se os conhecimentos atuais mais relevantes para a compreensão deste trabalho. Em primeiro lugar, aborda-se a degradação dos materiais porosos devido à cristalização de sais solúveis, focando em especial as principais características dos sais solúveis e dos materiais porosos e os mecanismos de degradação. Descrevem-se ainda os mecanismos associados ao transporte de água, quer no estado líquido quer no estado de vapor e a sua associação ao processo de secagem. Este capítulo assenta numa pesquisa de estudos desenvolvidos anteriormente, os quais possibilitaram identificar as lacunas do conhecimento que fundamentam a realização deste trabalho. Toda esta pesquisa serviu também de base à interpretação e discussão dos resultados experimentais obtidos.

No terceiro capítulo, apresenta-se a campanha experimental realizada. Primeiro descrevem-se os materiais utilizados e os procedimentos seguidos na preparação dos provetes e das soluções salinas, bem como os métodos de ensaio utilizados para a determinação do coeficiente de absorção por capilaridade e da sorvidade do material e avaliação do comportamento à secagem. Para cada ensaio apresentam-se os resultados obtidos e efetua-se a sua análise. No final do capítulo discutem-se os resultados obtidos no trabalho experimental.

No quarto e último capítulo apresentam-se as conclusões gerais deste trabalho, sendo também sugeridas algumas propostas para desenvolvimentos futuros.

2

AÇÃO DOS SAIS E HUMIDADE NOS EDIFÍCIOS

2.1. OS SAIS SOLÚVEIS E A SUA AÇÃO NOS MATERIAIS POROSOS DE CONSTRUÇÃO

2.1.1. INTRODUÇÃO

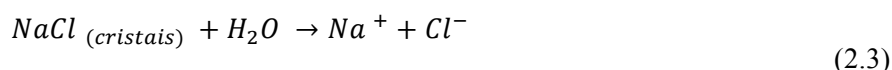
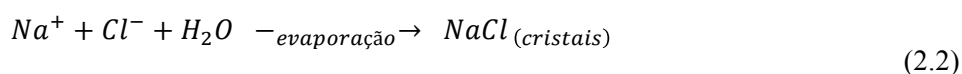
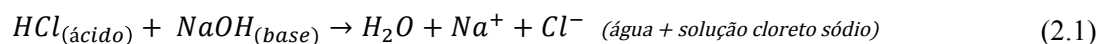
A presença simultânea de água e de sais solúveis no interior dos materiais porosos de construção dá origem a alguns dos principais problemas que surgem no âmbito da conservação do património histórico edificado. Esta presença é habitual e relevante nos edifícios antigos principalmente pelas seguintes razões [4]:

- Os edifícios antigos e patrimoniais incluem materiais porosos na sua constituição, o que facilita o transporte da humidade e dos sais para o seu interior;
- As paredes são normalmente construídas em contacto direto com o solo, pelo que a humidade ascensional é uma forma de manifestação de humidade frequente;
- Sais e humidade com diversas origens podem infiltrar-se nos elementos construtivos ao longo dos anos, principalmente se o edifício estiver em fase de degradação;
- As alvenarias antigas são mais suscetíveis à degradação por sais, uma vez que possuem baixa resistência mecânica, como por exemplo as argamassas de cal aérea;
- As consequências da degradação podem ser mais graves em edifícios antigos, porque muitas das paredes apresentam uma função de suporte e a sua deterioração pode levar ao colapso estrutural, como se vê frequentemente em edifícios abandonados;
- Muitos dos edifícios antigos para além de terem valor histórico e patrimonial, também contêm obras de arte, como esculturas e pinturas murais que podem perder-se caso sejam danificados pelos sais solúveis, por isso devem ser mantidos e conservados para que as gerações futuras possam usufruir dos mesmos, como definido na Carta de Veneza [5].

Os sais são transportados no interior dos materiais pela água, em soluções aquosas, sendo a degradação atribuída à sua cristalização. Os sais podem ter origem no solo, na água do mar, no nevoeiro salino, na poluição atmosférica, nos próprios materiais de construção ou mesmo em produtos armazenados nas proximidades (produtos alimentares salgados, pesticidas, dejetos de animais, etc.) [6]. Praticamente todos os tipos de alvenaria contêm sais solúveis, por exemplo sulfatos, nitratos, cloretos e carbonatos de sódio, potássio, cálcio, magnésio ou amónio, estes sais são depois transportados pela água da chuva, da humidade do terreno, de infiltrações ou de condensações e, portanto pode dizer-se que toda a água presente no interior das paredes e pavimentos é uma solução aquosa salina [7].

2.1.2. SAIS SOLÚVEIS

Os sais são compostos iônicos formados pela reação entre um ácido e uma base. Quando um sal é dissolvido na água, ele dissocia-se em íons. Chamam-se cátions se tiverem carga eletrônica positiva e aniões se tiverem carga eletrônica negativa [8]. A título de exemplo, fazendo reagir ácido clorídrico com hidróxido de sódio, a dissociação das moléculas do HCl e do NaOH, respectivamente, origina aniões (Cl⁻ e OH⁻) e cátions (H⁺ e Na⁺). Estes íons agrupam-se gerando cloreto de sódio e água (Equação 2.1). Por evaporação da água, formam-se cristais de cloreto de sódio (Equação 2.2). Quando se dissolvem os cristais de cloreto de sódio em água, o sal dissocia-se em íons sódio e cloreto (Equação 2.3):



Nem todos os sais provocam degradação em todas as circunstâncias, dependendo das suas propriedades e das condições a que são sujeitos (condições ambientes, características físicas e teor de água do material, etc.). Alguns sais solúveis contribuem para a degradação das alvenarias tais como, os cloretos, carbonatos, nitratos e sulfatos de cálcio, magnésio, potássio e sódio [3].

O tipo de sal é o melhor indicador da sua origem, apresentando-se na tabela 2.1 os mais correntes:

Tabela 2.1 – Principais sais solúveis e a sua origem, adaptado [3] [7].

Sal	Origem
Sulfatos, SO ₄ ²⁻	Poluição atmosférica (chuvas ácidas), solos fertilizados, materiais cerâmicos
Cloretos, Cl ⁻	Água do mar (quer por ação direta, quer através de salpicos, brisa ou nevoeiro marítimo, ou ainda através de solos contaminados), produtos salgados armazenados nos edifícios, contaminação de solos com resíduos domésticos
Nitratos, NO ₃ ⁻	Solos (utilização de fertilizantes orgânicos), excrementos de animais, matéria orgânica em decomposição.
Carbonatos, CO ₃ ²⁻	Reação química, na presença de água, entre os álcalis presentes, por exemplo, nas argamassas à base de cimento e o CO ₂ da atmosfera.

Os sais cristalizam essencialmente devido a processos evaporativos resultantes de alterações do microclima do ambiente que os rodeia, nomeadamente mudanças na humidade relativa ou

na temperatura do ar. As duas características dos sais solúveis mais importantes são a solubilidade e a higroscopicidade.

A solubilidade define-se como a quantidade máxima de um soluto que se pode dissolver, em condições de equilíbrio, numa determinada quantidade de solvente, a uma dada temperatura. A solubilidade da maioria das substâncias é afetada pela temperatura. A solubilidade de um sal é o que lhe permite dissolver-se em contacto com a água e formar uma solução aquosa salina.

Quando uma solução contém a máxima quantidade de soluto que pode conter em condições de equilíbrio a uma certa temperatura, diz-se uma solução saturada. Uma solução sobressaturada tem uma concentração de sal superior à de saturação, sendo esta uma condição metastável. Após algum tempo a solução reestabelece o equilíbrio, e portanto, o soluto dissolvido em excesso separa-se da solução e formando-se cristais (Figura 2.1). Quanto maior a quantidade de soluto em excesso, maior é a tendência do sal para cristalizar.



Figura 2.1 – Cristais de Nitrato de Potássio

O processo da cristalização envolve duas etapas principais, a nucleação e o crescimento dos cristais. A nucleação é a etapa em que as moléculas de soluto dispersas no solvente se vão juntando em aglomerados, ainda de dimensão nanométrica. Estes aglomerados vão constituir o núcleo dos futuros cristais mas só se tornam estáveis a partir de um certo tamanho crítico. Se não atingirem esse tamanho, redissolvem-se na solução. É nesta fase da nucleação que, os átomos se arranjam de forma definida no espaço, definindo desde logo a estrutura do cristal. A fase do crescimento do cristal é subsequente ao crescimento do núcleo que atingiu o tamanho crítico. A sobressaturação é o motor da cristalização. A nucleação e o crescimento dos cristais continuam a ocorrer simultaneamente enquanto a solução estiver sobressaturada. Quando a sobressaturação é vencida, o sistema atinge o equilíbrio e a cristalização está completa [9].

Alguns sais possuem diferentes formas cristalinas, consoante as condições ambientes de temperatura e humidade relativa, e outros apresentam apenas uma forma cristalina. A influência da temperatura na solubilidade também pode variar com o tipo de sal. Temos, por exemplo, o cloreto de sódio que é um dos sais mais conhecidos e estudados no âmbito da degradação de edifícios antigos por sais solúveis. A sua solubilidade praticamente não varia com a temperatura e possui apenas uma forma cristalina, a halite. Já o sulfato de sódio, que é um sal mais complexo, possui uma solubilidade muito sensível à temperatura e pode atingir sobressaturações elevadas. Além disso, apresenta três formas cristalinas consoante as condições de equilíbrio que favorecem a formação cada fase: pode cristalizar como thenardite, forma anidra (Na_2SO_4), como mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) que é a fase estável em

contacto com uma solução saturada, e como heptahidrato ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), que é uma fase metaestável. Para representar as várias formas cristalinas de um sal, existem os diagramas de fase que, são gráficos que mostram as condições de HR e temperatura que proporcionam a formação dessas mesmas fases. Em rigor, só devem aparecer nesses diagramas as fases de equilíbrio, mas na prática, normalmente a tracejado ou noutra cor, são também representadas as fases metaestáveis, como mostram as figuras 2.2 e 2.3.

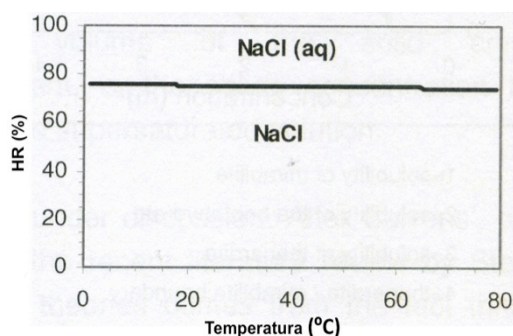


Figura 2.2 – Diagrama de fase NaCl [3].

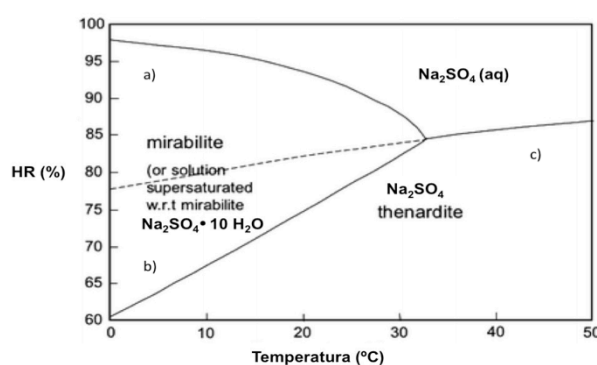


Figura 2.3 – Diagrama de fase Na_2SO_4 [3] [10].

- a) Deliquescência – cristalização da mirabilite
- b) Hidratação – desidratação
- c) Deliquescência – cristalização da thenardite

A higroscopicidade é uma propriedade dos sais solúveis que, em função das condições ambientes, lhes permite absorver humidade do ar. Neste contexto, é importante esclarecer o conceito de humidade relativa de equilíbrio de um sal ($\text{H.R.}_{\text{eq}}^{\text{sat}}$) que se relaciona com o de humidade relativa do ar (HR). A HR do ar é um parâmetro que expressa a relação em percentagem, entre a quantidade de humidade existente no ar e a quantidade máxima de humidade que o ar pode conter a determinada temperatura. A $\text{H.R.}_{\text{eq}}^{\text{sat}}$ de um sal corresponde à HR abaixo da qual um cristal sólido está em equilíbrio com o ar, a uma dada temperatura. Para:

- $\text{H.R.} = \text{H.R.}_{\text{eq}}^{\text{sat}}$ os cristais salinos absorvem humidade do ar e em condições de equilíbrio resultam numa solução saturada;
- $\text{H.R.} > \text{H.R.}_{\text{eq}}^{\text{sat}}$, os cristais salinos absorvem humidade do ar e vai formar-se uma solução salina diluída; quanto maior for a HR do ar mais diluída será a solução;
- $\text{H.R.} < \text{H.R.}_{\text{eq}}^{\text{sat}}$, os cristais salinos estão em equilíbrio com o ambiente; no caso de estar em solução, o solvente evapora e todo o sal contido na solução cristaliza.

O conceito de H.R._{eq} também se aplica a soluções salinas. A H.R._{eq} das soluções salinas que corresponde à H.R. acima de uma superfície livre da solução é sempre menor do que a H.R._{eq} da água pura, que é de 100%. A noção de pressão de vapor ajuda a compreender este fenómeno, pois quando ocorre a evaporação de um líquido, as suas moléculas gasosas exercem uma pressão, a chamada pressão de vapor da substância [11]. Quando se adiciona sal à água, os iões do sal vão substituir algumas moléculas à superfície do líquido, reduzindo a pressão de vapor. Quanto menor a pressão de vapor de uma solução, mais lenta é a evaporação.

Entre um material poroso saturado com determinada solução salina e o ambiente estabelece-se um gradiente de pressão. Quando:

- $\text{H.R.} = \text{H.R.}_{\text{eq}}$, o material nunca vai secar, pois gera-se um equilíbrio entre o material poroso e o ar ambiente.
- $\text{H.R.} > \text{H.R.}_{\text{eq}}$, o material poroso vai absorver a humidade do ar e não seca.

- $H.R. < H.R._{eq}$, o material poroso vai secar pois esta condição é favorável à evaporação do líquido contido no seu interior [3].

Os sais, no geral, são higroscópicos e, na prática da engenharia civil, alguns destes sais são chamados higroscópicos pelo facto de terem uma $H.R._{eq}$ que é frequentemente ultrapassada em condições correntes de obra, isso faz com que facilmente absorvam humidade do ar e provoquem problemas. Neste contexto, consideram-se higroscópicos quando a $H.R._{eq}$ é inferior a cerca de 75%. Quando a $H.R.$ é muito baixa estão permanentemente em solução, apesar de não darem origem a ciclos, também causam problemas de humidade.

Raramente a deterioração de materiais porosos por ação dos sais solúveis envolve um só sal. Geralmente estão envolvidos nesse fenómeno dois ou mais sais. A presença simultânea dos sais vai influenciar as características da solução. Contudo, não se deve abordar o problema com base nas propriedades individuais dos sais. De facto, uma solução de uma mistura de sais tem em geral uma só $H.R._{eq}$ a uma dada temperatura, mas sim uma gama de $H.R._{eq}$ e essa gama não tem que se cingir necessariamente aos valores de $H.R._{eq}$ individuais de cada sal [2].

Algumas propriedades das soluções salinas são muito importantes neste estudo, tais como a solubilidade, a concentração e a humidade relativa de equilíbrio já abordadas, mas faltam referir propriedades como a densidade, a viscosidade e tensão superficial das soluções salinas, que são essenciais quando se analisa a absorção capilar.

A densidade relaciona a massa da solução com o volume da solução; a densidade de uma solução salina é sempre superior à da água [12].

A viscosidade é uma propriedade física que caracteriza a resistência do fluido ao escoamento, a uma dada temperatura. Quando se aumenta a temperatura, a facilidade de escoamento é maior, quando a temperatura é mais baixa, o fluido oferece maior resistência ao escoamento, devido ao aumento da viscosidade. Quando se aumenta a concentração de uma solução salina, a sua viscosidade também aumenta [13].

A tensão superficial é a capacidade que um líquido possui em manter as moléculas unidas na sua superfície. Esta propriedade é consequência das forças intermoleculares, no interior de um líquido. Cada molécula é atraída por outras moléculas em todas as direções do espaço, enquanto que as moléculas superficiais só estão submetidas à atração das moléculas que têm por baixo. A tensão superficial da água é muito forte devido às pontes de hidrogénio intermoleculares e é responsável pela formação de gotas [14].

2.1.3. POROSIDADE E HIGROSCOPICIDADE

A porosidade é fundamental para a caracterização dos materiais de construção em termos físicos (durabilidade, resistência mecânica, etc.) e para a compreensão do fenómeno do transporte de água no interior da sua estrutura porosa.

Uma grande parte dos materiais de construção são porosos, os naturais como a pedra, ou os artificiais como o tijolo e as argamassas, contêm um certo volume de vazios. Estes são distribuídos no interior da massa sólida sob a forma de poros, de várias formas e tamanhos [7]. A porosidade de um material pode ser definida como a razão entre o volume total de vazios e o seu volume total aparente, em percentagem, como se apresenta na equação 2.4:

$$\varepsilon = \frac{V_a + V_i}{V_t} \quad (2.4)$$

onde V_a é o volume de vazios, V_i é o volume da fase sólida e V_t é o volume aparente do material, em m^3 .

Se os poros se encontrarem interligados, o material apresenta porosidade aberta, se se encontrarem isolados, a porosidade é fechada (figuras 2.4 e 2.5). Se a porosidade aberta permite que a água, no estado líquido ou de vapor, migre através do material. Quando a porosidade é fechada, o material é praticamente impermeável uma vez que não permite a circulação da água [15].

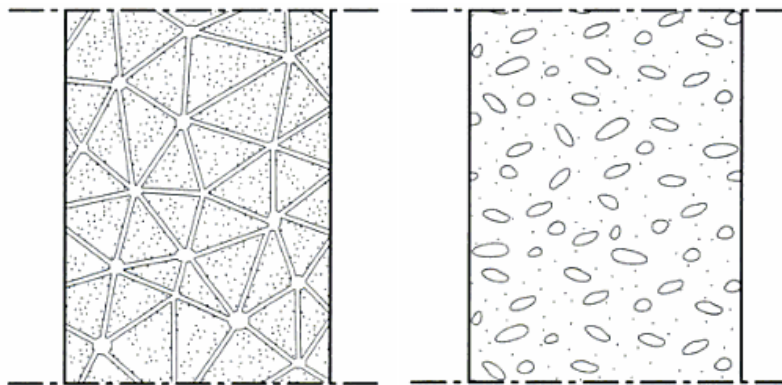


Figura 2.4 – Porosidade Aberta. [15] Figura 2.5 – Porosidade Fechada. [15]

A dimensão dos poros pode classificar-se em três grupos: os microporos não participam no transporte da água, porque o seu tamanho reduzido gera elevadas forças capilares que impedem a circulação da água. A água no estado líquido circula na rede formada pelos mesoporos, ou poros capilares. Os macroporos são responsáveis pelo transporte da água no estado de vapor, nestes poros a circulação de água líquida não é significativa pois as forças capilares que se geram são muito fracas.

A generalidade dos materiais de construção são materiais higroscópicos, ou seja, quando sujeitos a ambientes em que a humidade do ar varia, o seu teor de humidade também varia até atingirem um estado de equilíbrio devendo-se à adsorção (ou desadsorção) de moléculas de água do ar, no interior dos poros. A espessura da película de água adsorvida nas superfícies internas dos poros aumenta com a H.R. do ambiente. Este processo deve-se a forças intermoleculares ou de *Van der Waals* que atuam na interface sólido-fluido, no interior dos poros [15]. Numa primeira fase verifica-se a fixação de uma película de moléculas de água no interior dos poros (adsorção monomolecular) e numa segunda fase ocorre a deposição de várias outras camadas de moléculas (adsorção plurimolecular). A condensação capilar ocorre quando a camada de água, no interior dos poros, se torna tão espessa que todo o poro fica preenchido (figura 2.6) [15].

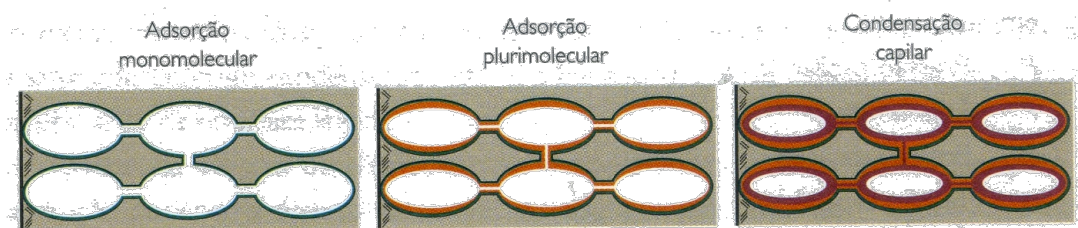


Figura 2.6 – Higroscopicidade [15].

2.1.4. A DEGRADAÇÃO POR SAIS SOLÚVEIS

A presença simultânea de sais e de água e os ciclos de cristalização são as causas da degradação dos materiais de construção porosos. Quando a água que transporta os sais, no interior dos materiais porosos, evapora devido a alterações das condições climáticas, a solução torna-se mais concentrada, podendo tornar-se supersaturada. Nesse caso o sal cristaliza, dando origem a eflorescências e/ou criptoflorescências. As eflorescências surgem quando num material, a taxa de fornecimento da solução salina é superior à taxa de evaporação. Assim a solução chega até à superfície, onde evapora e os cristais desenvolvem-se nessa superfície. As criptoflorescências formam-se quando, pelo contrário, a taxa de fornecimento da solução é inferior à taxa de evaporação e os cristais vão desenvolver-se no interior dos poros. A cristalização tem sido considerada como a causa principal da degradação dos materiais porosos por sais solúveis, por induzir tensões internas no interior dos poros (figura 2.7).

São muitos os fatores que condicionam a degradação por ação dos sais, entre eles o meio físico onde todos estes fenómenos ocorrem, o material de construção: as características hídricas (permeabilidade ao vapor de água e absorção capilar) que condicionam a migração das soluções (água líquida ou sob a forma de vapor) e ainda a resistência mecânica que condiciona a forma como o material resiste às tensões internas criadas nos poros. Os fatores ambientes também influenciam este processo, nomeadamente a temperatura e HR do ar, a radiação solar e a velocidade e direção do vento, que influenciam bastante a secagem [6] .



Figura 2.7 Exemplos da degradação por sais em edifícios [3].

Em suma, a degradação por sais solúveis em materiais porosos requer a presença simultânea de água e sais solúveis e também de condições ambiente suscetíveis de criar ciclos de dissolução-recristalização.

A figura 2.8 sintetiza os fatores envolvidos neste processo:

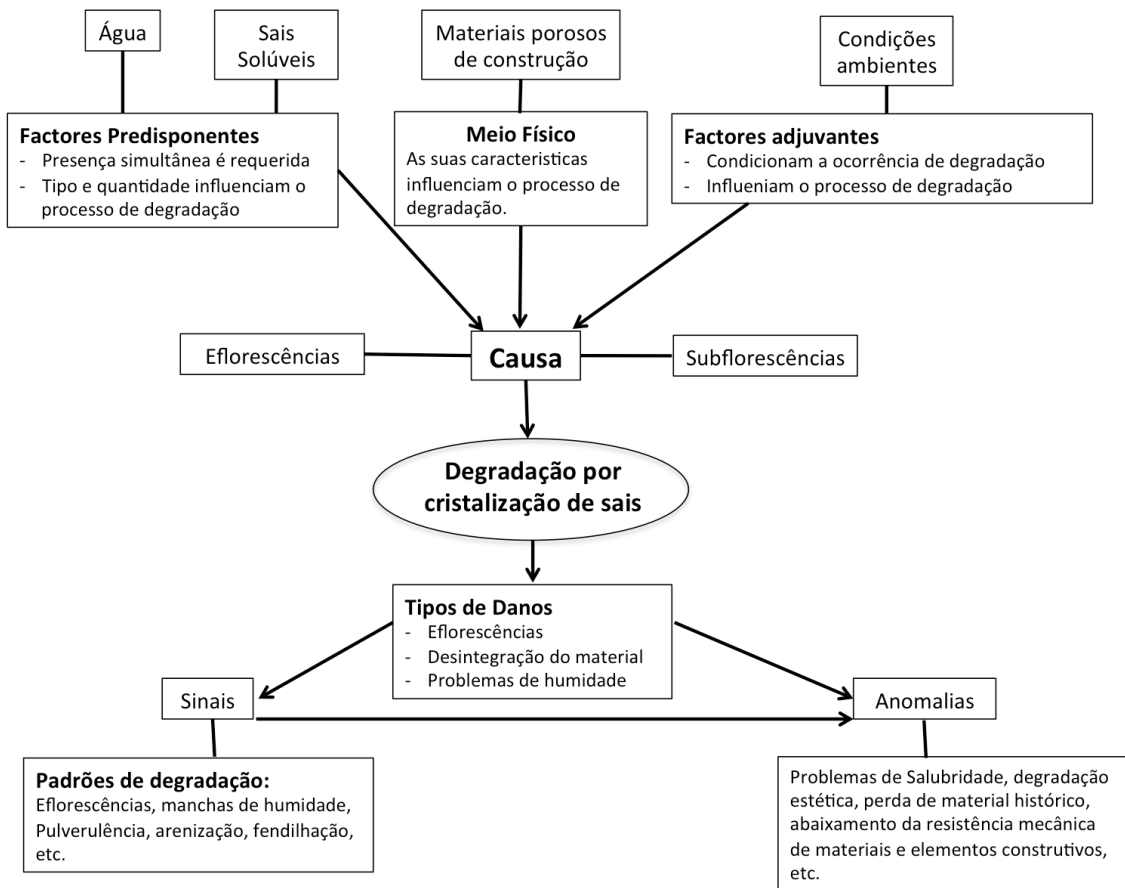


Figura 2.8 – Degradação por ação dos sais. [4]

Como indicado com canto inferior esquerdo da figura, a degradação por ação dos sais pode manifesta-se de várias formas, como alterações superficiais (eflorescências ou manchas de humidade), fendilhação, formação de crostas, separação dos materiais da alvenaria em camadas (delaminação, esfoliação, destacamento de camadas de aplicação de rebocos, etc.), perda de coesão (pulverulência de tijolo cerâmico ou de pedra, arenização de argamassas, etc.) ou formação de vazios (alveolização) [6].

Segundo E. Borrelli [7] existe uma relação entre a solubilidade dos sais e a sua ação destrutiva.

- Sais praticamente insolúveis: não conduzem a fenómenos perigosos de cristalização, mesmo que a sua baixa solubilidade lhes permita atingir a saturação, a concentração de saturação é mínima e insuficiente para causar danos visíveis.
- Sais pouco solúveis: são geralmente mais perigosos, provocam perda de coesão do material.

- Sais altamente solúveis podem acumular-se e atingir concentrações muito elevadas. Como alguns são sais higroscópicos permanecem em solução em ambientes húmidos, originando manchas escuras nos paramentos.

Os sais causam muitos danos nos edifícios, porém o(s) mecanismo(s) de degradação envolvidos ainda não estão totalmente explicados. Levantam ainda muitas dúvidas na comunidade científica, pelo que têm vindo a ser publicadas várias teorias. São três as teorias mais citadas, que vão ser sintetizadas nos parágrafos seguintes:

- Teoria da Pressão Linear de Cristalização

A cristalização dos sais solúveis no interior de materiais porosos vai provocar tensões internas na estrutura porosa, pois os cristais desenvolvem-se linearmente no seu interior contra as paredes dos poros. Esta teoria denomina-se Teoria da Pressão Linear de Cristalização e atualmente é o mecanismo que reúne maior consenso. Em 1949 Correns publicou uma expressão que sustenta esta teoria para o cálculo da pressão exercida por um cristal em crescimento que, ainda hoje é muito utilizada mas também, questionada:

$$\Delta p = \frac{RT}{V_c} + \ln \left(\frac{C}{C_s} \right) \quad (2.5)$$

Onde Δp é a pressão de cristalização, R é a constante dos gases perfeitos, T é a temperatura em graus Kelvin, V_c é o volume molar do sal no estado sólido, C é a concentração da solução aquando da cristalização e C_s a concentração da solução na saturação [2] e [16].

- Teoria a Pressão de Hidratação

A teoria da pressão de hidratação baseia-se no facto de alguns sais hidratarem e desidratarem, consoante variações da H.R. e da temperatura. O sulfato de sódio, por exemplo, possui duas fases hidratadas, como se vê na figura 2.3. A hidratação resulta num aumento de volume do sal, por fixação de moléculas de água, que também irá induzir um aumento de pressão na estrutura porosa. Esta teoria no entanto tem vindo a ser abandonada com o avanço dos estudos nesta área que provam que nem todos os sais, como é o caso por exemplo do cloreto de sódio, possuem formas hidratadas nas condições de HR, temperatura e pressão de interesse e porque se concluiu que a hidratação consiste na realidade na dissolução da fase anidra seguida de uma recristalização do sal na fase hidratada. Portanto a pressão é na realidade uma pressão de cristalização[3], [2] e [16].

- Teoria da dilatação térmica diferencial

Em 1968, Cookie and Smalley propuseram a teoria da dilatação térmica diferencial como possível mecanismo da degradação de rochas por ação de sais solúveis, baseia-se na existência de sais com coeficientes de dilatação superiores aos dos minerais constituintes das rochas, porém esta teoria carece ainda de fundamentação [2] e [16].

2.2. TRANSPORTE DE HUMIDADE E SECAGEM: MECANISMOS FÍSICOS

2.2.1. TRANSPORTE LÍQUIDO

As paredes constituídas por materiais porosos absorvem água. Se esta se encontrar no estado líquido, penetra e percorre a rede capilar do material. A absorção capilar de um líquido por um material poroso vai depender não só da sua microestrutura (quantidade, disposição e tamanho dos poros) [17] [18] como também de três propriedades características do líquido que são, a tensão superficial σ , viscosidade η e densidade ρ [19].

O transporte de água líquida no interior de materiais porosos, dá-se essencialmente por capilaridade. A capilaridade é uma força que se cria quando um líquido entra em contacto com uma superfície sólida, e se originam duas forças de sentidos contrários, a força de adesão e a força de coesão (figura 2.9).

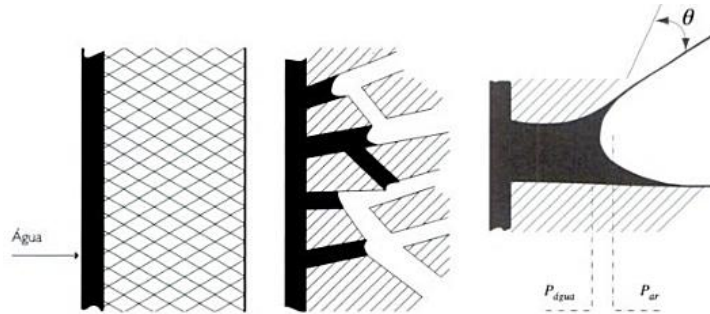


Figura 2.9 – O fenómeno da capilaridade [15].

A primeira resulta da atração das moléculas do líquido pelas moléculas do sólido. A segunda da coesão do próprio líquido, que atua no sentido contrário. As moléculas da superfície livre do líquido estão sujeitas à resultante dessas duas forças. Quando a adesão for superior à coesão, forma-se um menisco côncavo e o líquido molha o sólido. O ângulo de contacto formado entre a superfície do líquido e a superfície do sólido é menor que 90° e no caso de um tubo capilar vertical, a pressão capilar opõe-se à gravidade, induzindo assim o movimento da água para o interior do tubo. Pelo contrário, quando a coesão for superior à adesão forma-se um menisco convexo, o líquido já não molha o sólido, uma vez que o ângulo de contato é superior a 90° (figura 2.10) [20].

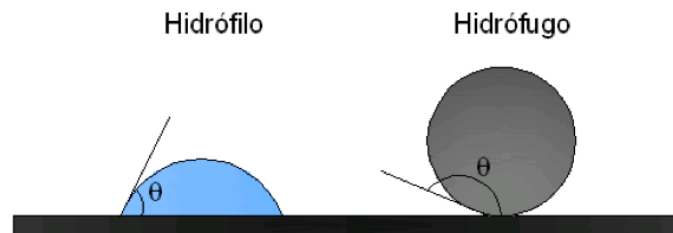


Figura 2.10 – Ângulos de contato para materiais hidrófilos e hidrófugos [21].

A capilaridade é então, uma força de sucção devida à subpressão capilar que se cria nos poros. Esta é calculada pela Equação 2.6 (em N/m²):

$$p_c = -\frac{2\sigma}{r} \cdot \cos \theta \quad (2.6)$$

Onde σ é a tensão superficial do líquido (em N/m), r é o raio capilar (em m) e θ é o ângulo de contacto (em graus).

A subpressão capilar é inversamente proporcional ao raio dos capilares e decresce com a temperatura.

A rede capilar dos materiais de construção porosos é demasiado complexa para que seja possível efetuar uma análise individual dos capilares. A caracterização destes materiais em relação à transferência da água por capilaridade, é efetuada a nível macroscópico através da determinação de coeficientes globais que se obtêm no ensaio de capilaridade.

O ensaio de capilaridade consiste em colocar um provete de um material poroso, impermeabilizado nas faces laterais, em imersão parcial, de forma a que ocorra a absorção

capilar pela sua base (figura 2.11) e a partir de pesagens periódica, determina-se a quantidade de água absorvida que em geral se expressa através de um gráfico semelhante ao da figura 2.12. Esta curva de absorção capilar é constituída por dois segmentos retos, o primeiro segmento reto corresponde ao preenchimento da maior parte dos poros interligados, o segundo troço corresponde ao preenchimento dos restantes poros através da difusão, na água, do ar retido no sistema poroso. O ponto de inflexão entre os dois segmentos traduz o momento em que a franja capilar atinge a superfície superior do provete. O coeficiente de capilaridade corresponde ao declive do primeiro troço linear [3].

No ensaio de capilaridade, a massa total de água absorvida W (kg/m^2) e a altura da ascensão capilar H (m) são diretamente proporcionais à raiz quadrada do tempo t (s):

$$W(t) = C \cdot \sqrt{t} \quad (2.7)$$

$$H(t) = B \cdot \sqrt{t} \quad (2.8)$$

Sendo C , o coeficiente de absorção de água por capilaridade ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{1/2})$) e B o coeficiente de penetração capilar ($\text{m}/\text{s}^{1/2}$). O primeiro coeficiente é usado com maior frequência e foi o utilizado na presente dissertação. O último coeficiente é mais difícil de obter, pois pode não ser simples distinguir a zonas húmidas das zonas secas, ou a interface entre as duas ser irregular.

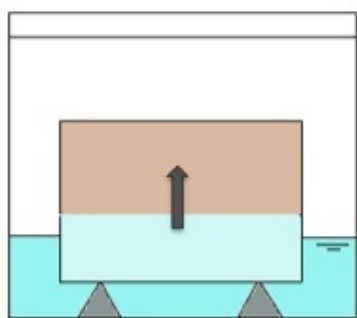


Figura 2.11 – Ensaio de absorção por capilaridade (adaptado [3]).

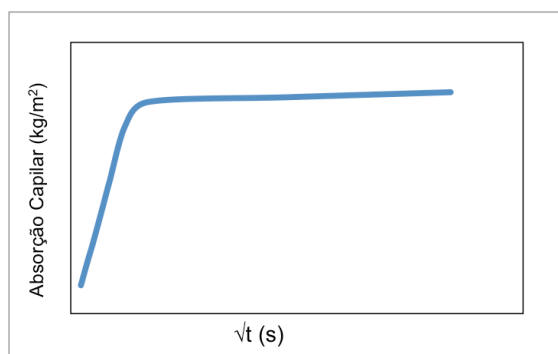


Figura 2.12 – Curva típica de absorção por capilaridade de um material poroso.

2.2.2. TRANSPORTE NA FASE DE VAPOR

O transporte de vapor em materiais porosos pode ser descrito como um processo termodinâmico de difusão causado por um gradiente de concentração do vapor de água. Sempre que um material está exposto a ambientes com diferentes HR, logo diferentes pressões de vapor, gera-se um fluxo de humidade entre os dois ambientes permitindo a transferência de humidade no sentido da maior pressão para a menor pressão (da maior para a menor H.R.). Este fenómeno pode ser expresso pela primeira lei de Fick, equação 2.9.

$$\vec{j}_w = -D_v \cdot \vec{\nabla}c \quad (2.9)$$

Onde, j_w é o fluxo de vapor, em $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, D_v é coeficiente de difusão, em $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, e c representa a concentração de vapor de água, em $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

O sinal negativo significa que o fluxo se dá no sentido da maior concentração de vapor para as zonas de menor concentração.

Partindo do princípio que o ar se comporta como um gás ideal, o fluxo difusão (c_w) pode ser expresso em função da pressão do vapor de água (p_w).

$$p_w = \frac{c_w \cdot R \cdot T}{M_w} \Leftrightarrow c_w = \frac{p_w \cdot M_w}{R \cdot T} \quad (2.10)$$

Em que p_w é a pressão do vapor de água, em Pa, c_w é a concentração de vapor, em kg/m³, R é a constante dos gases ideais, T é a temperatura, em Kelvin, M_w é a massa molar da água, em kg/mol.

A permeabilidade ao vapor de água, π (kg.m⁻¹.s⁻¹.Pa⁻¹), equação 2.11, é uma grandeza característica de cada material, e expressa a quantidade de vapor (kg) que atravessa uma espessura unitária do material (m), por unidade de tempo (s) e de superfície (m²), quando a diferença de pressão entre as duas faces do material é também unitária (Pa).

$$\pi = \frac{D_v \cdot M_w}{R \cdot T} \quad (2.11)$$

O ensaio laboratorial que permite determinar a permeabilidade ao vapor de água de um material é designado poro método da tina. É criado um regime estacionário de transporte de vapor unidirecional através de um material. O provete do material é fixado sobre uma tina, que contém no seu interior uma solução salina capaz de criar uma determinada H.R. à temperatura de ensaio. A interface provete/tina é vedada para que o transporte de humidade se dê só através do provete (figura 2.13). O conjunto tina-provete é armazenado numa câmara climática, sendo periodicamente pesado até o fluxo de vapor que atravessa o provete ser constante. Este método pode apresentar duas variantes, quando a H.R. no interior da tina é inferior à do ambiente, o fluxo dá-se do exterior para o interior da tina (método da “tina seca”). Quando a H.R. no interior da tina é superior à do ambiente, o fluxo dá-se do interior para o exterior da tina (método da “tina húmida”).

Admitindo que o fluxo é unidirecional, a permeabilidade ao vapor de água do material pode ser calculada através da equação 2.12:

$$j = \pi \cdot \frac{(p_{vi} - p_{ve})}{e} \quad (2.12)$$

Onde j é o fluxo de vapor (kg/m².s), $(p_{vi} - p_{ve})$ é a diferença de pressão entre o ambiente exterior e interior (Pa), e é a espessura do provete do material poroso (m) e π é a permeabilidade ao vapor de água (kg/(m.s.Pa)).

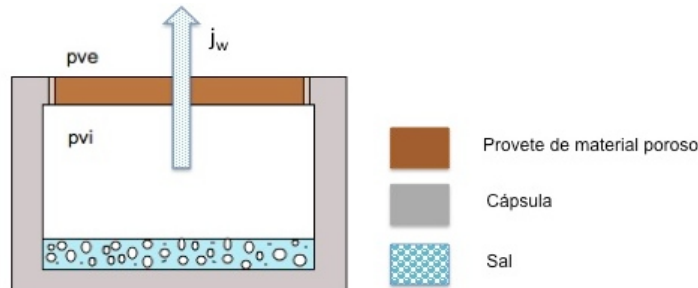


Figura 2.13 – Ensaio de permeabilidade ao vapor de água, método da “tina húmida”, adaptado [21].

Caso o provete seja constituído por um material higroscópico, os resultados do ensaio de permeabilidade poderão ser afetados devido a dois mecanismos, a condensação capilar e a

difusão à superfície, que não são em geral tidos em conta nos ensaios laboratoriais. De facto, quanto maior for a HR do ar a que o material está exposto, maior será o seu teor de humidade devido à adsorção de moléculas de água. Quando a espessura da película criada pelas moléculas de água preenche completamente os poros verifica-se a condensação capilar. A posterior migração da água líquida para a face em contacto com o ambiente de menor HR, promove o aumento do fluxo de humidade. A difusão de superfície também se deve ao gradiente de HR que acontece no ensaio de permeabilidade ao vapor de água. A espessura da camada de moléculas de água adsorvidas varia com a HR do ar, gerando-se um gradiente de concentração. A difusão de superfície é o processo difusivo que tende a homogeneizar esse gradiente, adicionando-se ao transporte de vapor por difusão molecular [16].

2.2.3. SECAGEM

A secagem define-se como o processo pelo qual a água abandona um material poroso. Considerando um provete saturado e selado em todas as faces, exceto numa (para que o fluxo seja unidirecional) e analisando a situação macroscopicamente, a secagem pode ser dividida em duas fases mais importantes:

- 1ª fase: O teor de água do material é elevado e a água líquida é transportada até à superfície do material devido a forças de capilaridade. A evaporação dá-se à superfície, pois é onde se localiza a frente húmida. Nesta fase, a distribuição de água na espessura do provete é homogénea e a taxa de secagem é constante, o que significa que o teor de humidade diminui linearmente ao longo do tempo.
- 2ª fase: O teor de água do material atinge o ponto crítico quando a diminuição deste teor de água faz com o fluxo líquido se torne insuficiente para compensar a evaporação. Então, a frente húmida vai recuar para o interior do material. O transporte por capilaridade passa a ser realizado até à frente de secagem e depois por difusão do vapor até à superfície. A frente húmida vai recuando progressivamente, aumentando assim a espessura de material seco que o vapor tem que atravessar até à superfície, a taxa de secagem abranda.
- A existência de uma terceira fase de secagem não é consensual. A partir do momento em que deixa de haver continuidade líquida nos poros, o transporte da humidade passa a dar-se predominantemente por difusão em todo o provete, mas esse momento é indefinido na curva de secagem. O teor de água vai diminuindo muito lentamente até atingir o teor de água de equilíbrio higroscópico.

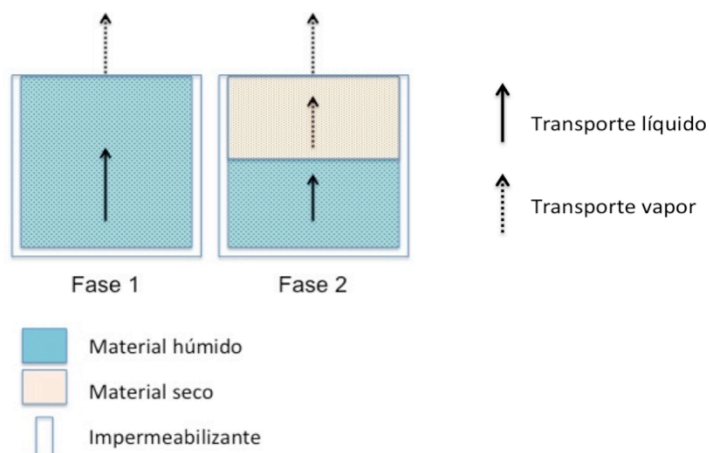


Figura 2.14 – Fases do processo de secagem, adaptado [3]

Uma forma prática de avaliar a secagem nos materiais porosos de construção é através da curva de secagem em ambiente condicionado [22], que traduz o processo acima descrito (Figura 2.15).

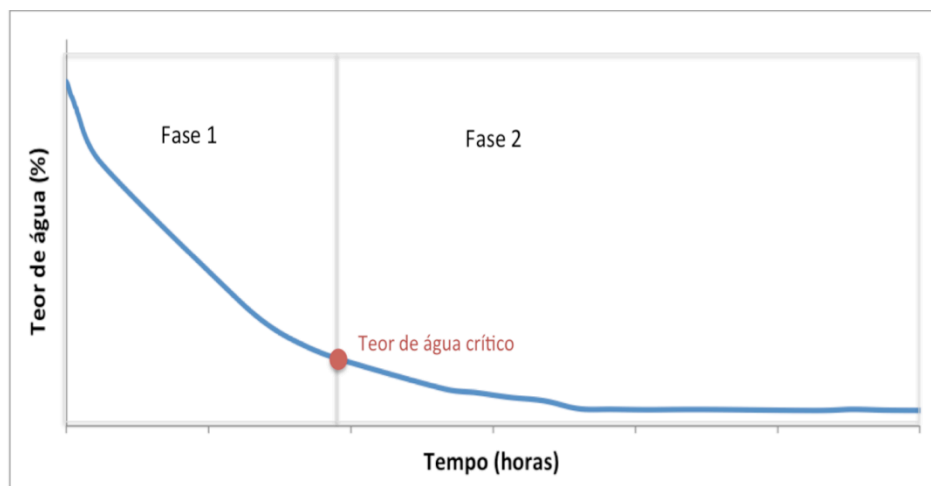


Figura 2.15 – Curva típica de secagem, adaptado [3].

A curva de secagem exprime o teor de água do provete, dado em percentagem da massa seca, em função do tempo. A taxa de secagem é dada pelo declive da curva. Como se pode ver na curva de secagem, dá-se especial importância às duas primeiras fases de secagem, que são consideradas as mais relevantes. A existência da terceira fase de secagem não reúne o consenso da comunidade científica, uma vez que não é possível determinar o momento em que esta começa e porque não há necessariamente uma redução abrupta da taxa de secagem. A primeira fase é um troço reto que implica uma diminuição linear do teor de água, logo a taxa de secagem é constante. O ponto de inflexão definido na curva é o teor de água crítico, é a transição entre a primeira e a segunda fase de secagem, a taxa de secagem deixa de ser constante, passando a ser decrescente. A transição entre a segunda e a terceira fase de secagem é habitualmente indefinida.

A posição da frente húmida vai determinar a localização dos processos de cristalização no material, pelo que ao modo como decorre a secagem é determinante em relação às formas que essa degradação assume.

A taxa de evaporação de água num material poroso pode ser muito afetada quando este está contaminado por sais solúveis, influenciando a taxa de secagem [6]. Uma das principais causas desta redução da taxa de secagem é o facto dos sais terem uma HR_{eq}^{sat} menor que a água pura, que se refletirá num gradiente de pressão de vapor mais baixo entre a frente húmida e o ar circundante, tendo como consequência uma diminuição da taxa de evaporação [6]. Outro fator é o provável bloqueio dos poros do material pelos cristais.

O posicionamento mais superficial da frente húmida, como consequência da baixa taxa de evaporação, vai trazer consequências graves, como por exemplo, problemas de humidade induzida pelos sais [23] mas por outro lado, não há tanta tendência de se formarem subflorescências, o que também pode ser vantajoso.

A secagem também é influenciada por fatores externos, como as condições ambiente ou as propriedades do material.

2.3. ESTUDOS ANTERIORES SOBRE INFLUÊNCIA DOS SAIS SOLÚVEIS EM MATERIAIS POROSOS

2.3.1. CONTRIBUTO DOS ESTUDOS ANTERIORES

Em Portugal existem poucos estudos feitos sobre a influência dos sais na secagem e na absorção capilar. Estes aspetos têm sido mais estudados pela equipa do Laboratório Nacional de Engenharia Civil no âmbito de projetos como o DRYMASS - Secagem de materiais de construção porosos eventualmente contaminados com sais solúveis, no qual a presente dissertação se enquadra.

A nível internacional existem alguns trabalhos e autores que estudam o transporte de soluções salinas no interior dos materiais porosos. Pode indicar-se, como exemplo, uma obra de referência que é o livro 'Water Transport in Brick, Stone and Concrete' dos autores C.Hall and W. Hoff que estuda exaustivamente o transporte da água no interior de materiais de construção porosos, abordando também o caso das soluções salinas, embora de forma pouco aprofundada. Na realidade, os trabalhos sobre o transporte de soluções salinas são relativamente escassos também a nível internacional. Enunciam-se a seguir alguns estudos relevantes para a presente dissertação.

Não há muitos trabalhos anteriores que, a partir de resultados experimentais, discutam, a validade da relação de linearidade prevista pela teoria entre a sorvidade e $(\sigma/\eta)^{1/2}$. Pode referir-se Gummerson *et al.* [24] e Beltrán *et al.* [25] que a verificaram com resultados positivos para o caso da absorção por materiais cerâmicos de vários líquidos orgânicos e água.

Gummerson *et al.*, em 1980, investigaram exaustivamente o movimento da água no interior dos materiais porosos segundo leis teóricas. Também determinaram experimentalmente a sorvidade para alguns materiais de construção mais comuns como vários tipos de pedra, tijolo e argamassas e betão, na presença de água e compostos orgânicos [24], tendo concluído que a massa de água absorvida varia linearmente com a raiz quadrada do tempo e assim consegue-se perceber facilmente as diferenças na sucção entre diferentes materiais. Os resultados também indicam que a repetição dos ciclos imersão/secagem não afeta a absorção capilar do tijolo. A correlação entre a sorvidade e $(\sigma/\eta)^{1/2}$ é boa, na generalidade. Estes resultados suportam a hipótese de que a absorção destes líquidos no tijolo é essencialmente um fenómeno de capilaridade pura.

Em 1988, Beltrán *et al.* conceberam um aparelho e um método rápido e expedito de determinar a sorvidade em materiais cerâmicos porosos. Trata-se de um modelo dinâmico simples que permite relacionar a taxa de sucção de líquidos de materiais cerâmicos porosos com as propriedades físicas do líquido (densidade, viscosidade e tensão superficial) e com as propriedades do sólido que caracterizam a sua rede porosa (por exemplo o raio médio dos poros) [25]. Assim pode referir-se que Beltrán *et al.* [25], como citados por Hall e Hoff [19], verificaram uma boa relação de linearidade entre a sorvidade e $(\sigma/\eta)^{1/2}$ para o caso da absorção de vários líquidos orgânicos e água, por materiais cerâmicos porosos.

Alguns autores como Hall e Hoff [19] defendem que o transporte por capilaridade mantém-se inalterado pela presença de sais. Por outro lado, também se tem defendido que os sais podem reduzir significativamente a taxa de fluxo capilar, devido a alterações da densidade, viscosidade e tensão superficial da solução [26]. Rucker *et al.* [27] realizaram ensaios de absorção por capilaridade em provetes de arenito natural com água e soluções de cloreto de sódio, [27] nitrato de sódio e sulfato de magnésio, com diferentes concentrações. Estes ensaios foram realizados com um objetivo, o de avaliar um método não-destrutivo para a

determinação da distribuição do teor de água e de sal, e não o de avaliar a influência dos sais no transporte por capilaridade. Porém os resultados experimentais revelaram uma diminuição do coeficiente de absorção por capilaridade com a concentração de sal.

Espinosa Marzal e Scherer, em 2008 [28], estudaram a obstrução dos poros induzida pela cristalização dos sais no calcário de Indiana. Utilizaram duas soluções salinas de cloreto de sódio com diferentes concentrações, uma solução de sulfato de sódio e uma solução de sulfato de magnésio. Os provetes depois de secarem na estufa a 60°C, foram postos em contacto com a água ou com a solução salina durante 24 horas, para se determinar a sorvidade. Antes do ensaio da secagem, impermeabilizaram-se cinco faces de cada provete com uma resina epoxy, para que a evaporação se desse só por uma face. Concluíram que a linearidade da capilaridade foi sustentada pelas soluções de sulfato de sódio e pelas duas concentrações de cloreto de sódio. A capilaridade da solução de sulfato de magnésio teve um comportamento diferente, inicialmente foi parabólico e só depois linear que os autores atribuíram à baixa sorvidade relacionada com a alta viscosidade da solução de sulfato de magnésio. Já quando representaram a sorvidade em função de $(\sigma / \eta)^{1/2}$, verificaram que estava de acordo com os resultados previstos, ou seja, que têm uma correlação linear entre si. Isto significa que a influência dos sais na capilaridade só depende do efeito que eles têm nas propriedades do líquido. Esta conclusão é válida quando se considera o raio dos poros constante, o que exclui alterações da rede porosa causadas pela precipitação do sal.

Os testes de secagem efetuados pelos mesmos autores revelaram que os provetes mais rápidos a secar eram os imersos em água pura, e seguidos dos de sulfato de sódio e depois, muito mais lentamente, dos provetes imersos em cloreto de sódio e sulfato de magnésio. Este diferente comportamento foi atribuído à redução da sorvidade devida à influência da viscosidade do líquido, que se traduz na relação $(\sigma / \eta)^{1/2}$ e à obstrução parcial dos poros do calcário de Indiana e à consequente redução do fluxo capilar. Esta induziria um deslocamento da frente de secagem para o interior do material e, consequentemente, um processo de secagem mais demorado.

Mais recentemente, em 2013, V. Brito e T. Gonçalves estudaram os efeitos do cloreto de sódio e do nitrato de sódio na capilaridade e na cinética de secagem de três tipos de pedra [29]. A morfologia da camada da eflorescência formada em cada caso e o efeito dessa camada no transporte de vapor também foi avaliada.

Utilizaram-se quatro soluções com concentração diferente no caso do cloreto de sódio, e três no caso do nitrato de sódio. As três pedras utilizadas foram o arenito de Bentheimer, e duas pedras calcárias, a Pedra de Ançã e outro calcário de baixa porosidade. Por ordem sequencial e sobre os mesmos provetes determinou-se o coeficiente de absorção capilar, a curva de evaporação e a curva de secagem dos provetes contaminados com água e com as soluções salinas.

Os resultados confirmaram que a mais lenta secagem se deve em parte à influência dos sais dissolvidos no transporte líquido. O transporte capilar é mais lento quando há sais solúveis e esse efeito deve-se à influência dos sais na tensão superficial (σ) e na viscosidade do líquido (η): observou-se que a sorvidade diminuía com a concentração de sal mas era sempre proporcional a $(\sigma / \eta)^{1/2}$ como previsto pela teoria.

Contudo, mostraram também que pode haver uma redução adicional da taxa de secagem, em certos casos, devida ao impedimento do transporte de vapor resultante do bloqueio dos poros pelos cristais. Este efeito dos sais é muito dependente da morfologia dos cristais; isto foi observado nas eflorescências mas faz sentido esperar o mesmo para os depósitos de sais internos, as criptoflorescências. As crostas compactas que se criam na superfície podem ser

um obstáculo à passagem do vapor. Porém, as camadas de eflorescências porosas com uma insignificante influência no transporte de vapor também são frequentes, podendo a diferença entre os dois tipos não ser facilmente detetável a olho nú. A morfologia das eflorescências depende de fatores como o tipo de sal e das características do material poroso, mas também de fatores aleatórios que podem ser muito significativos, como pequenas heterogeneidades nas condições ambiente ou na rede porosa do material de construção.

Este trabalho contraria na prática as conclusões de Espinoza-Marzal e Scherer, [28], sobre a redução do fluxo capilar devido ao bloqueio dos poros. De facto, as autoras verificaram, a partir de ensaios de permeabilidade ao vapor dos provetes com e sem eflorescências, que nos casos em que não há bloqueio do transporte de vapor, a cinética de secagem é igual para sais diferentes desde que a relação $(\sigma / \eta)^{1/2}$ seja idêntica, ou seja, seja tal que o seu efeito na capilaridade é semelhante.

2.3.2. CONTRIBUTO DO PRESENTE ESTUDO

A necessidade de desenvolver este estudo prende-se com o que se concluiu anteriormente, o facto de, até ao momento, se terem desenvolvido poucos estudos que se debrucem sobre a absorção por capilaridade de soluções salinas em materiais porosos. Por isso neste trabalho utilizaram-se materiais não antes testados para este fim, uma argamassa de cal aérea e um tijolo cerâmico, bem como seis soluções salinas que ainda não tinham sido utilizadas e comparadas num só estudo. Os sais mais estudados são o cloreto de sódio e o sulfato de sódio. Há também dados em relação à influência na absorção e na secagem de outros sais como o sulfato de magnésio [28] e o nitrato de sódio [29]. Neste trabalho optou-se por utilizar sais de sódio ou de potássio, que são os mais comuns na prática [30] e testar um leque mais alargado que incluiu o cloreto de potássio, nitrato de sódio, nitrato de potássio e carbonato de sódio e também, claro, o cloreto de sódio e o sulfato de sódio.

2.4. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo abordou-se a ação dos sais solúveis e humidade nos edifícios, mais especificamente as características dos sais solúveis e dos materiais de construção porosos, os mecanismos de degradação por sais solúveis e o transporte de água, sob o estado líquido e de vapor, no interior dos materiais porosos. Assim, resumidamente, é possível concluir o seguinte:

- Os sais solúveis têm várias origens, tanto pode ser uma fonte externa ao edifício (o solo, a água do mar, o nevoeiro salino ou poluição atmosférica) como pode ser nos próprios materiais de construção (materiais cerâmicos e cimento) ou produtos armazenados na proximidades (produtos salgados, pesticidas ou dejetos de animais);
- A degradação causada pelos sais solúveis pressupõe a existência simultânea de água e sais bem como de condições ambiente suscetíveis de criar ciclos de cristalização/dissolução;
- Os sais solúveis dissolvem-se na água que penetra como , humidade ascensional, por infiltrações, condensações, ou com outras origens, são transportados para o interior dos materiais porosos, circulando na sua rede porosa como uma solução salina;
- A cristalização dos sais é um dos principais mecanismos responsáveis pela degradação dos materiais porosos, sendo provocada por variações de temperatura e HR e pela consequente evaporação da água da solução salina;

- A transferência de água líquida, quando não existe pressão hidrostática, dá-se principalmente por capilaridade. A capilaridade é a tendência que algumas substâncias apresentam de subirem ou descerem por paredes de tubos capilares. A sucção capilar é tanto maior quanto menor for o diâmetro dos poros ou dos tubos capilares, e está estreitamente relacionada com a estrutura interna do material. A determinação experimental do coeficiente de capilaridade consiste em colocar um provete de um material poroso em imersão parcial em água, de forma a que ocorra absorção capilar pela sua base, e pesar periodicamente para determinar a quantidade de água absorvida. Definida a curva de absorção capilar, o coeficiente de capilaridade corresponde ao declive do primeiro troço reto;
- O transporte de vapor em materiais porosos pode ser descrito como um processo termodinâmico de difusão, desencadeado por um gradiente de concentração de vapor de água. Sempre que um material está exposto a ambientes com diferentes H.R., gera-se um fluxo entre os dois ambientes, com transferência de humidade no sentido da maior H.R. para a menor H.R., até se atingir o equilíbrio. O ensaio laboratorial que permite determinar a permeabilidade ao vapor de um material poroso baseia-se na criação de um regime estacionário de transporte de vapor unidirecional através de um provete do material. O provete é fixado sobre uma tina que contém no seu interior uma solução salina capaz de criar um ambiente com determinada HR a uma determinada temperatura de ensaio. Este dispositivo é armazenado numa câmara climática e sendo periodicamente o conjunto tina/provete pesado até o fluxo de vapor que atravessa o provete se apresentar constante.
- A secagem define-se como o processo pelo qual a água abandona um material poroso. Divide-se essencialmente em duas fases, que facilmente se distinguem observando a curva de evaporação:
 - 1ª fase: o teor de água no material é elevado, a água líquida é transportada até à superfície do material por forças de capilaridade. A taxa de secagem é constante;
 - 2ª fase: o teor de água do material atinge o estado crítico. A frente de secagem vai recuando progressivamente, aumentando assim o transporte por difusão e diminuindo o transporte por capilaridade. A taxa de secagem abrandando.

Os estudos científicos selecionados e analisados pela sua relevância para o desenvolvimento desta dissertação os resumidamente apresentados na tabela 2.2:

Tabela 2.2 – Resumo dos estudos anteriores sobre absorção capilar em materiais porosos

Autor	Estudo	Principais conclusões
Gummerson et al. (1980)	Movimento da água no interior dos materiais porosos.	Boa correlação linear entre a sorvidade e $(\sigma/\eta)^{1/2}$ para vários tipos de pedra, tijolo, argamassas e betão na presença de água e compostos orgânicos.
Beltrán et al. (1988)	Sucção líquida por materiais cerâmicos porosos.	Boa correlação linear entre a sorvidade e $(\sigma/\eta)^{1/2}$ para materiais cerâmicos porosos na presença de líquidos orgânicos e água.
Ruiz- Agudo et al. (2007)	O papel das propriedades das soluções salinas, na deterioração por sais, do calcário poroso por sulfato de sódio e magnésio.	Os resultados mostraram que os sais podem reduzir significativamente a taxa de fluxo capilar, devido a alterações da densidade, viscosidade e tensão superficial da solução.
Rucker et al. (2000)	Determinação do teor de água e de sal através da combinação das medições de NMR e raios gama.	Os resultados experimentais revelaram uma diminuição do coeficiente de absorção por capilaridade com a concentração de sal.
Espinosa- Marzal e Scherer (2008)	Obstrução dos poros induzida pela cristalização de sais no calcário de Indiana.	Existe uma correlação linear entre a sorvidade e $(\sigma/\eta)^{1/2}$, isto significa que a influência dos sais na capilaridade só depende do efeito que eles têm nas propriedades do líquido.
V. Brito e T.Gonçalves (2012)	Efeitos do cloreto de sódio e nitrato de sódio na capilaridade e na cinética de secagem em três tipos de pedra.	Os resultados confirmaram que a secagem mais lenta se deve, em parte, à influência dos sais dissolvidos no transporte líquido e isso deve-se à influência dos sais na tensão superficial (σ) e viscosidade do líquido (η). Observou-se que a sorvidade diminuía com a concentração de sal mas era sempre proporcional a $(\sigma/\eta)^{1/2}$, como previsto pela teoria. Os resultados mostraram também que pode haver redução adicional da taxa de secagem, em alguns casos devido ao impedimento do transporte de vapor resultante do bloqueio dos poros pelos cristais. Este efeito é muito dependente da morfologia dos cristais.

3

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA CAPILARIDADE E DA SECAGEM DE DOIS MATERIAIS POROSOS EM PRESENÇA DE SAIS SOLÚVEIS

3.1. INTRODUÇÃO

A campanha experimental teve como objetivo principal avaliar a influência de seis tipos de sais solúveis na absorção de água por capilaridade e na cinética de secagem, em dois tipos de materiais de construção porosos, um tijolo cerâmico e uma argamassa de cal. Durante a monitorização da secagem, também se observou e avaliou a degradação dos materiais e a relação desta com cada tipo de sal.

A escolha destes dois materiais prende-se com o facto de eles serem muito correntes em alvenarias de edifícios antigos

Realizaram-se dois tipos de ensaios, de absorção por capilaridade com água e seis soluções salinas saturadas, e ensaios de secagem. Estes dois ensaios foram realizados sobre o mesmo conjunto de provetes para minimizar as variações decorrentes da heterogeneidade dos materiais, facilitando o cruzamento dos resultados dos dois ensaios.

O ensaio de absorção por capilaridade foi o primeiro a ser realizado pelo que na sequência deste foi realizado o ensaio de secagem que teve como ponto de partida o estado de saturação atingido no final do ensaio de capilaridade.

Neste capítulo caracterizam-se os materiais e soluções utilizados, descreve-se a preparação dos provetes, e apresenta-se a metodologia utilizada em cada ensaio, os respetivos resultados e a sua análise.

3.2. MATERIAIS UTILIZADOS

Nesta campanha experimental foram utilizados 21 provetes de tijolo e 21 provetes de argamassa de cal, cedidos pelo LNEC. Estes materiais já tinham sido utilizados noutros estudos que incluíram também ensaios de capilaridade e onde se avaliava sobretudo a secagem [21] [31] [32].

Os provetes de tijolo foram cortados de tijolos maciços obtendo-se provetes cúbicos com dimensões 5cm x 5cm x 5cm como mostra a figura 3.1. A porosidade deste tijolo é aproximadamente de 19,6% [33].

Os provetes de argamassa de cal aérea foram fabricados no LNEC [21] com o traço volumétrico de 1:1,5:1,5 (cal: areia de rio: areia amarela) e dimensões 5cm x 5cm x 5cm (figura 3.2). A porosidade da argamassa é em média de 20,8% [33].

As dimensões de ambos os provetes, de 5cm x 5cm x 5cm foram escolhidas porque o ensaio é feito de acordo com os procedimentos da RILEM [22] que considera que os provetes devem ter 4 a 5 cm de lado.

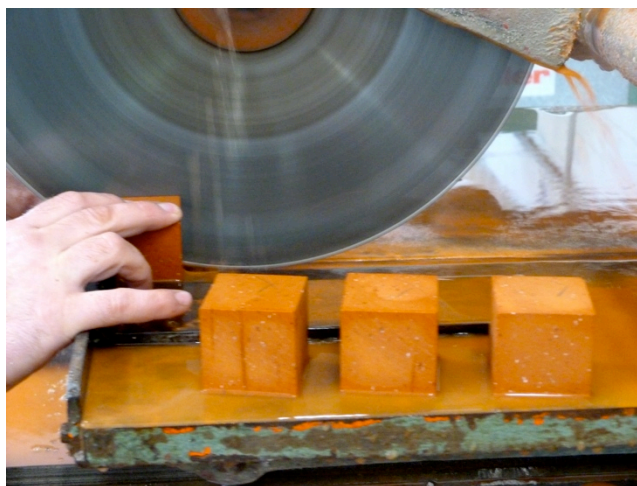


Figura 3.1 – Tijolo Cerâmico na máquina de corte no LNEC.



Figura 3.2 – Proвете de argamassa de cal aérea.

Após a identificação e pesagem de todos os provetes, estes foram impermeabilizados nas quatro faces laterais com uma resina epoxi (figura 3.3) constituída por dois componentes (Icosit 101 da Sika). A resina foi aplicada em duas demãos dadas em sentidos cruzados com um intervalo de 24 horas. Esta resina foi selecionada tendo em conta os bons resultados obtidos em trabalhos anteriormente realizados no LNEC, pois não escorre durante a aplicação, é impermeável à água, na forma líquida e vapor, e não migra para o interior do provete [31].

É muito importante garantir que a impermeabilização seja cuidadosa e minuciosa, uma vez que um pouco de resina sobre as faces destinadas à absorção capilar ou à secagem pode influenciar os resultados, já que pela área impermeabilizada não ocorrerá absorção nem

evaporação. Os coeficientes de absorção capilar e os índices de secagem podem resultar em valores adulterados e afetar as conclusões do ensaio.

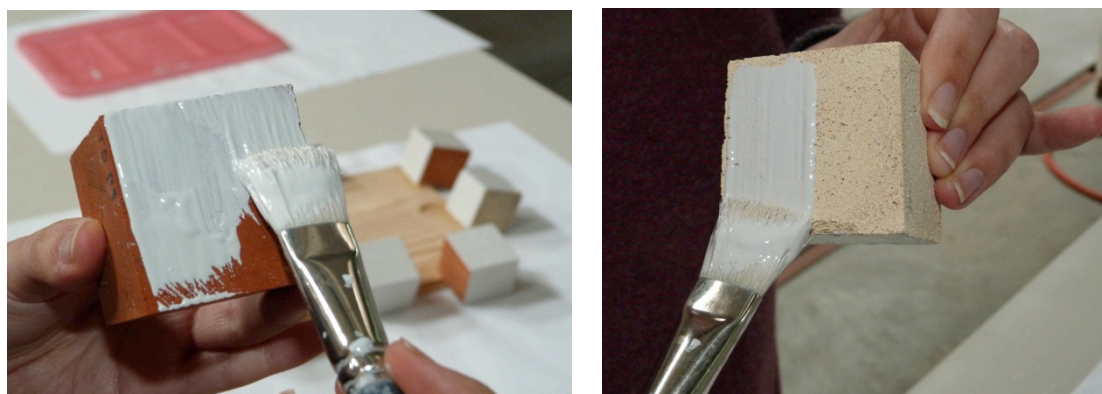


Figura 3.3 a) e b)– Aplicação da resina impermeabilizante nos provetes de tijolo e de argamassa.

Os sais utilizados nas soluções aquosas salinas saturadas, e algumas das suas propriedades já abordadas no capítulo 2 estão representados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades das soluções, a 20°C.

Soluções	Solubilidade (g/L) [34]	Concentração W (%) ^{a)}	H.R.-eq. (%) [3]	Densidade ρ (kg/m ³) [35] ^{b)}	Viscosidade η (cP) [35] ^{b)}	Tensão Superficial σ (mN/m) [35] [36] ^{b)}
Água	-	-	100,00	998,21	1,002	72,8
Cloreto Sódio (NaCl)	360	26,47	75,47	1195,23	2,002	82,40
Sulfato Sódio (Na ₂ SO ₄)	195	16,32	95,6	1153,70	1,857	76,78
Cloreto Potássio (KCl)	342	25,48	85,11	1169,70	1,044	79,01
Nitrato Sódio (NaNO ₃)	876	46,70	75,36	1356,26	2,682	86,22
Nitrato Potássio (KNO ₃)	470	31,97	94,62	1213,40	1,029	76,70
Carbonato Sódio (Na ₂ CO ₃)	215	17,70	91,60	1185,12	3,052	77,90

a) Concentração= (massa soluto/massa solução)x100

b) Dados obtidos por interpolação / extrapolação, exceto os da água.

A solubilidade das soluções varia com o soluto, com o solvente e com a temperatura a que se encontra a solução. Na maior parte dos casos se se aquecer a solução saturada com depósito de sal no fundo, este dissolve-se totalmente, uma vez que o coeficiente de solubilidade aumenta com a temperatura. Deixando a solução arrefecer em repouso, até esta voltar à temperatura ambiente, 20°C, obteremos uma solução supersaturada, pois contem mais soluto dissolvido do que a solubilidade àquela temperatura [11]. Recorreu-se ao aumento da temperatura, para dissolver o soluto na água mais facilmente, com o auxílio de um agitador magnético, com regulador de temperatura (figura 3.4). As soluções foram preparadas com uma quantidade de sal em excesso, para garantir a saturação. Em seguida, foram filtradas para assegurar que ao vertê-las para o recipiente da capilaridade, não escapassem cristais (figura 3.5).



Figura 3.4 – Agitador magnético com regulador de temperatura com solução supersaturada de Na_2SO_4 .



Figura 3.5 – Filtração da solução sobressaturada de Na_2SO_4 .

3.3. ENSAIO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

3.3.1. MÉTODO DE ENSAIO

O ensaio de absorção por capilaridade foi efetuado com base no Procedimento nºII.6 “Water Absorption Coefficient (Capillarity)” da RILEM [22]. O ensaio teve como objetivo determinar e avaliar o coeficiente de capilaridade dos provetes de tijolo e de argamassa na

presença de água (ensaio que serviu como referência) e das soluções aquosas salinas saturadas atrás referidas. O ensaio foi realizado sobre 42 provetes, 21 de tijolo e 21 de argamassa, utilizando-se três provetes de cada material para cada solução (água + seis sais). Quanto maior o número de provetes para a mesma situação, maior será a confiança nos resultados experimentais e maior a sensibilidade para os resultados obtidos, detetando-se eventuais erros ou discrepâncias.

Antes de se iniciarem os ensaios objeto de estudo, realizou-se um ensaio preliminar com a água e com a solução aquosa salina de cloreto de sódio de modo a estabelecer a periodicidade das pesagens. Obtendo-se como resultado a necessidade de aumentar o número de pesagens, durante as primeiras oito horas, para as soluções salinas, comparativamente ao ensaio da água.

Inicialmente os provetes foram secos em estufa ventilada a 60°C, até se obter massa constante, a fim de determinar a sua massa seca, figura 3.6.



Figura 3.6 – Provates dentro da estufa ventilada.

Após este processo, os provetes foram colocados em caixas de plástico, imersos parcialmente nas soluções salinas, assentes numa rede sobrelevada, permanecendo a altura da lâmina líquida 5 mm acima da face inferior dos provetes. As caixas de plástico foram depois fechadas com tampa para evitar a evaporação, figura 3.7.

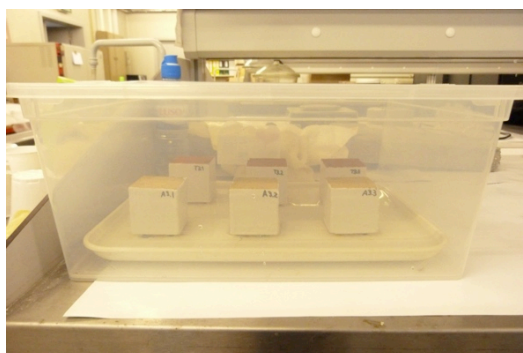


Figura 3.7 – Ensaio de absorção por capilaridade a decorrer dentro de uma caixa de plástico fechada.

A periodicidade de pesagem dependeu do material, tijolo ou argamassa, e da substância líquida, água ou solução salina:

- tijolo em água: 1 min, 3 min, 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 60 min, 8h e 24h [31];
- tijolo em solução salina: 1 min, 3 min, 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 60 min, 1h30, 2h, 2h30, 3h, 3h30, 8h e 24h;
- argamassa de cal aérea em água: 2 min, 5min, 10 min, 15 min, 30 min, 45 min, 60 min, 3h, 4h, 6h, 7h e 24h [21];
- argamassa de cal aérea em solução salina: 2 min, 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 45 min, 60 min, 1h15, 1h30, 1h45, 2h, 2h15, 2h30, 2h45, 3h, 4h, 6h, 7h e 24h.

Monitorizou-se o processo somente até às 24h uma vez que se verificou ser o tempo suficiente para o peso dos provetes estabilizar e para se obter a curva de absorção capilar até à estabilização- entrada em patamar.

3.3.2. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.3.2.1 Coeficiente de Absorção por Capilaridade

O coeficiente de absorção por capilaridade determina-se expressando a variação da massa do provete durante o processo de absorção em função da raiz quadrada do tempo.

A água absorvida por unidade de área (M_w) é expressa por:

$$M_w = \frac{M - M_0}{S} \quad (3.1)$$

Em que, M é a massa do provete no instante t , M_0 é a massa seca do provete e S é a área da base do provete em contacto com a água/solução.

Com os resultados obtidos nas pesagens dos ensaios, obtém-se a curva de absorção capilar, que expressa a quantidade de água absorvida por unidade de superfície (kg/m^2) em função da raiz quadrada do tempo decorrido ($\text{s}^{1/2}$), em segundos. O declive do primeiro troço linear corresponde ao coeficiente de absorção capilar ou coeficiente de capilaridade (C).

Nas figuras 3.8 a 3.14, apresentam-se as curvas de absorção capilar para o tijolo quando imerso em água e nas seis soluções aquosas salinas. Nas tabelas 3.2 a 3.8 apresentam-se os correspondentes valores individuais e médios do coeficiente de capilaridade, bem como o respetivo desvio padrão e o coeficiente de variação. Na figura 3.15 sintetiza-se o valor médio deste coeficiente e seu desvio padrão para cada solução.

Foram detetados alguns casos em que o comportamento de alguns provetes se afastava significativamente do comportamento dos restantes do mesmo tipo, talvez por alguma heterogeneidade na sua estrutura interior ou por algum lapso experimental. Por isso, quando se calculou o valor médio do coeficiente de capilaridade, desvio padrão e coeficiente de variação, excluíram-se esses valores. Essas situações estão devidamente sinalizadas na Tabela 3.2, Tabela 3.4, Tabela 3.6 e Tabela 3.12.

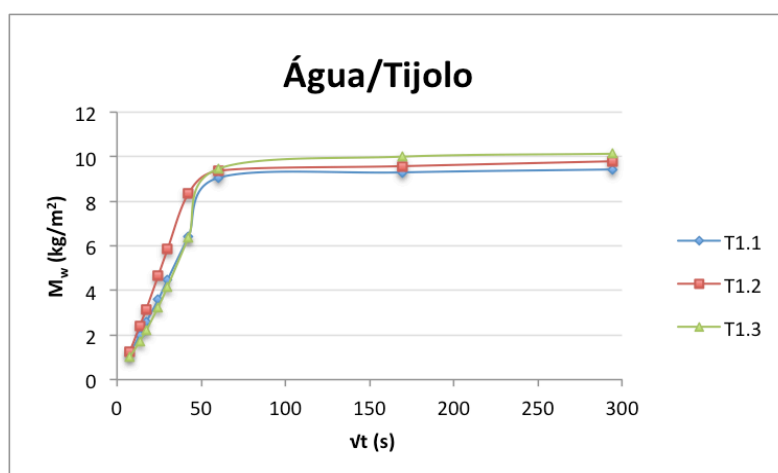


Figura 3.8 – Curvas de absorção capilar dos provetes de tijolo, imersos parcialmente em água.

Tabela 3.2 – Coeficientes de capilaridade do tijolo, imerso parcialmente em água.

Provete	Coeficiente de Capilaridade ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$)			
	Valor individual	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
T1.1	0,1474	0,1448	0,0037	2,53%
T1.2	0,2067			
T1.3	0,1422			

* Valores calculados excluindo o resultado do provete T1.2.

O coeficiente de capilaridade do tijolo em água está de acordo com a bibliografia existente [31] [33]. O provete T1.2 apresenta um resultado desviante e por isso descartou-se esse valor no cálculo da média, desvio padrão e coeficiente de variação.

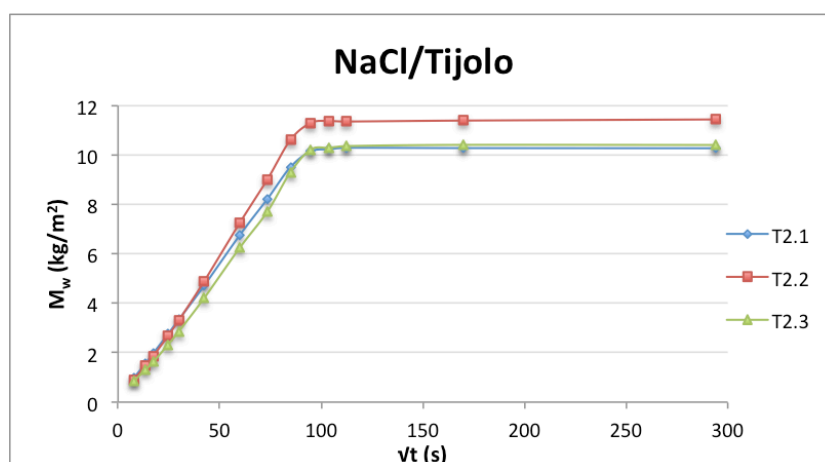


Figura 3.9 –Curvas de absorção capilar dos provetes de tijolo, imersos parcialmente em solução aquosa de cloreto de sódio.

Tabela 3.3 – Coeficiente de Capilaridade do Tijolo, imerso parcialmente em solução aquosa de cloreto de sódio.

Provete	Coeficiente de Capilaridade ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$)			
	Valor individual	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
T2.1	0,1069	0,1022	0,0095	9,3%
T2.2	0,1084			
T2.3	0,0912			

Os resultados obtidos são razoavelmente homogêneos, percebe-se que há uma tendência apesar do coeficiente de capilaridade do provete T2.3 ser um pouco mais baixo. O coeficiente de variação traduz isso mesmo. O sal neste caso teve um efeito de diminuição do coeficiente de absorção capilar.

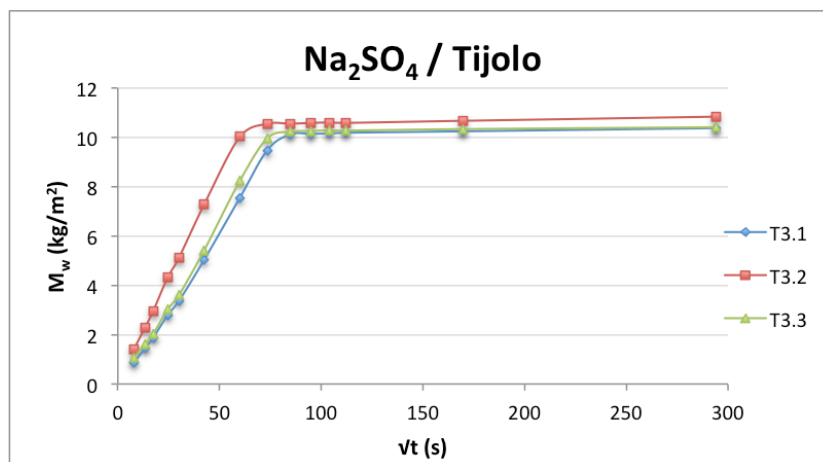


Figura 3.10 –Curvas de absorção capilar dos provetes de tijolo, imersos parcialmente em solução aquosa de sulfato de sódio.

Tabela 3.4 – Coeficiente de Capilaridade do Tijolo, imerso parcialmente em solução aquosa de sulfato de sódio.

Proвете	Coeficiente de Capilaridade ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$)			
	Valor individual	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
T3.1	0,1145	0,1159*	0,0019*	1,65%*
T3.2	0,1701			
T3.3	0,1172			

* Valores calculados excluindo o resultado do provete T3.2

Os coeficientes de capilaridade do sulfato de sódio apresentavam grande dispersão, devido ao resultado do provete T3.2 que é elevado comparando com os resultados dos provetes T3.1 e T3.3. Decidiu-se portanto, descartar o resultado do provete T3.2, como acima explicado, apesar de não existirem valores na bibliografia que sirvam de orientação. Conclui-se que o sulfato de sódio também faz baixar o coeficiente de capilaridade quando se compara com os provetes de referência.

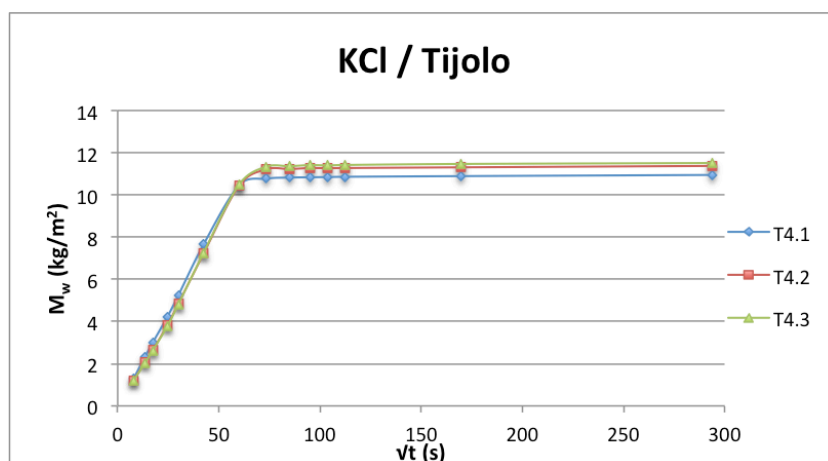


Figura 3.11 –Curvas de absorção capilar dos provetes de tijolo, imersos parcialmente em solução aquosa de cloreto de potássio.

Tabela 3.5 – Coeficiente de capilaridade do tijolo, imerso parcialmente em solução aquosa de cloreto de potássio.

Proвете	Coeficiente de Capilaridade ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$)			
	Valor individual	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
T4.1	0,1768	0,1673	0,0082	4,9%
T4.2	0,1632			
T4.3	0,1620			

Os resultados do cloreto de potássio são bastante próximos e coerentes, sendo o coeficiente de variação baixo e por isso não foi necessário descartar valores. Verifica-se que o cloreto de potássio teve como efeito o aumento do coeficiente de capilaridade, em relação aos provetes de referência.

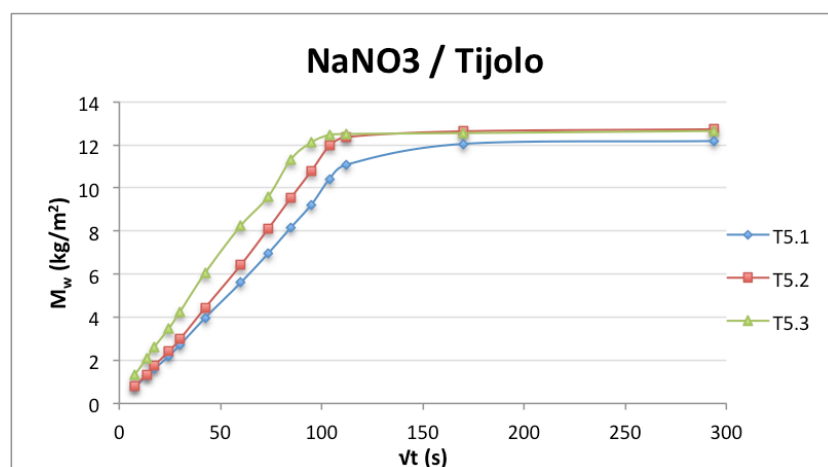


Figura 3.12 –Curvas de absorção capilar dos provetes de tijolo, imersos parcialmente em solução aquosa de nitrato de sódio.

Tabela 3.6 – Coeficiente de capilaridade do tijolo, imerso parcialmente em solução aquosa de nitrato de sódio.

Provete	Coeficiente de Capilaridade ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$)			
	Valor individual	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
T5.1	0,0876	0,0926*	0,0071*	7,63%*
T5.2	0,0976			
T5.3	0,1302			

* Valores calculados excluindo o resultado do provete T5.3

Os provetes testados na solução de nitrato de sódio apresentam coeficientes de capilaridade com uma dispersão considerável, sendo o provete T5.3 o que se afasta mais em relação aos outros dois valores. Não existem valores na bibliografia que sirvam como orientação mas uma vez que os provetes T5.1 e T5.2 apresentam resultados próximos, assumiu-se que o coeficiente de capilaridade do provete T5.3 decorreu, como acima explicado, de algum lapso experimental ou defeito do provete, pelo que não foi considerado. Também neste caso se verifica que o sal faz baixar o coeficiente de capilaridade em relação à água pura.

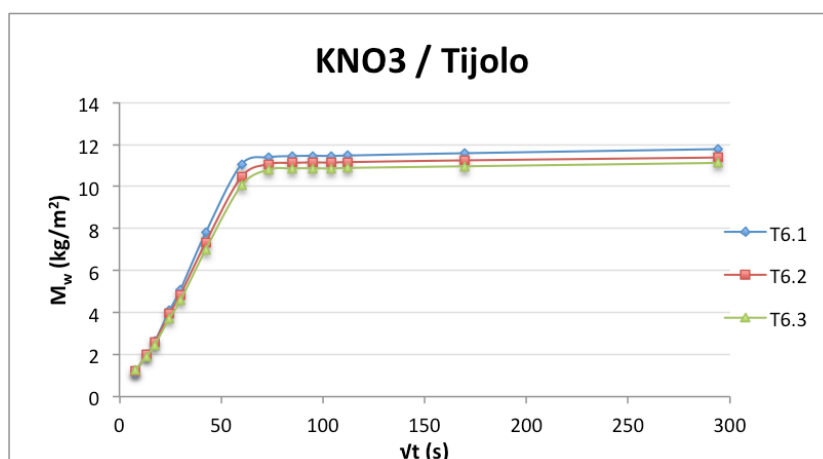


Figura 3.13 –Curvas de Absorção Capilar dos provetes de tijolo, imersos parcialmente em solução aquosa de nitrato de potássio.

Tabela 3.7 – Coeficiente de Capilaridade do Tijolo, imerso parcialmente em solução aquosa de nitrato de potássio.

Provete	Coeficiente de Capilaridade ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$)			
	Valor individual	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
T6.1	0,1803	0,1665	0,0139	8,4%
T6.2	0,1666			
T6.3	0,1525			

Os coeficientes de absorção capilar dos provetes ensaiados com nitrato de potássio apresentam alguma dispersão entre eles. O desvio padrão do nitrato de potássio é o mais alto de todas as soluções no tijolo, que significa a dispersão em relação à média. Verifica-se que este sal provoca um coeficiente de capilaridade superior aos provetes de referência, ensaiados com água.

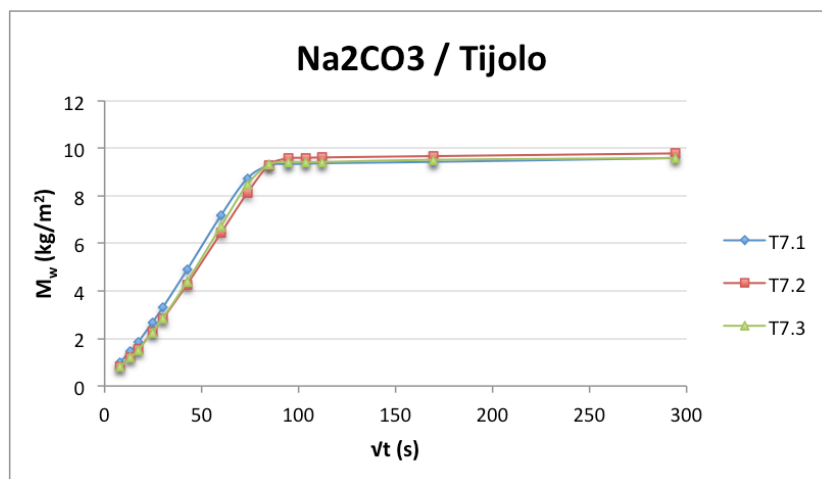


Figura 3.14 –Curvas de Absorção Capilar dos provetes de tijolo, imersos parcialmente em solução aquosa de carbonato de sódio.

Tabela 3.8 – Coeficiente de Capilaridade do Tijolo, imerso parcialmente em solução aquosa de carbonato de sódio.

Proвете	Coeficiente de Capilaridade ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$)			
	Valor individual	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
T7.1	0,1050	0,0967	0,0072	7,4%
T7.2	0,0921			
T7.3	0,0931			

Os provetes de tijolo ensaiados com solução aquosa de carbonato de sódio apresentam resultados coerentes. O coeficiente de variação é aceitável mesmo contando com o coeficiente de capilaridade do provete T7.1 que é ligeiramente superior aos outros dois provetes mas que se enquadra perfeitamente na média dos três resultados.

Analisando todos os valores, podemos dizer que os provetes de tijolo ensaiados com soluções que contêm o composto iônico Na^+ apresentam um coeficiente de absorção por capilaridade inferior aos provetes de referência e os provetes de tijolo ensaiados com soluções compostas em parte pelo ião K^+ apresentam um coeficiente de absorção capilar superior aos provetes testados em água.

A figura 3.15 ilustra bem estas conclusões:

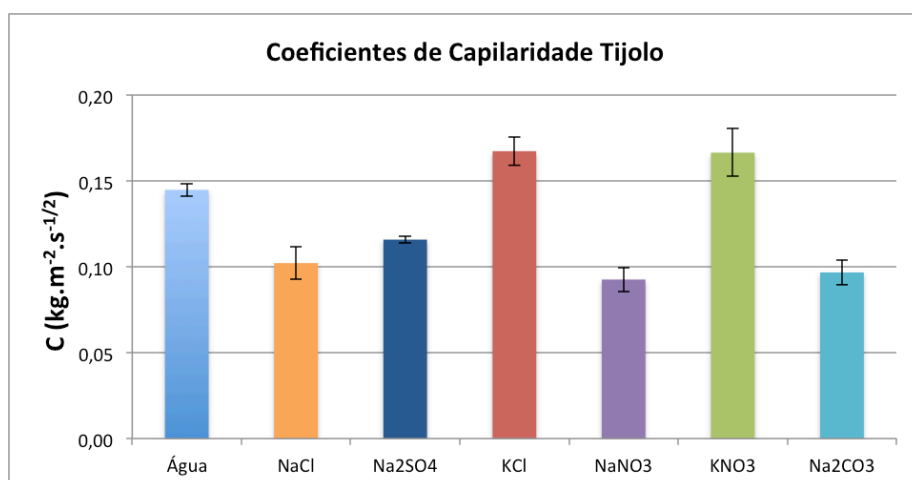


Figura 3.15 –Média e desvio padrão do coeficiente de capilaridade para cada solução no Tijolo

Nas figuras 3.16 a 3.22 apresentam-se as curvas de absorção capilar para os provetes de argamassa de cal aérea, quando imersos em água e nas seis soluções aquosas salinas. Nas tabelas 3.9 a 3.15 apresentam-se os valores individuais e médios dos coeficientes de capilaridade, o respetivo desvio padrão e o coeficiente de variação. No final, na figura 3.23, faz-se uma comparação dos valores médios do coeficiente de capilaridade e respetivo desvio padrão para as várias soluções aquosas salinas e para a água.

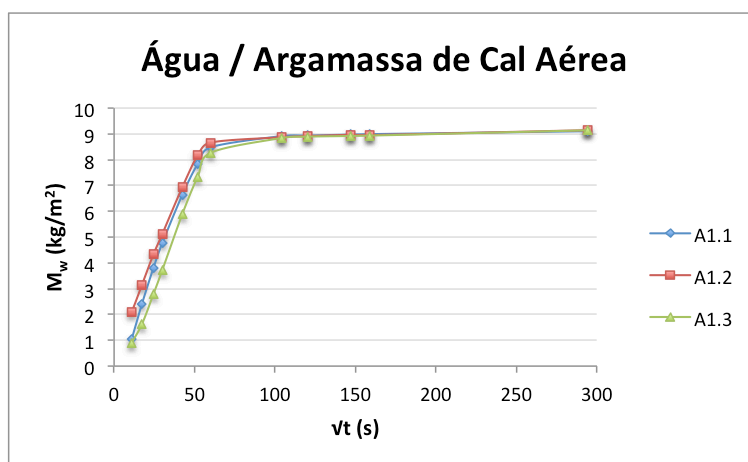


Figura 3.16 –Curvas de absorção capilar dos provetes de argamassa, imersos parcialmente em água.

Tabela 3.9 – Coeficiente de capilaridade dos provetes de argamassa, imersos parcialmente em água.

Proвете	Coeficiente de Capilaridade (kg.m ⁻² .s ^{-1/2})			
	Valor individual	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
A1.1	0,1775	0,1642	0,0120	7,3%
A1.2	0,1541			
A1.3	0,1610			

Nos provetes de argamassa ensaiados com água verifica-se que os valores estão de acordo com os valores apresentados na bibliografia [21] [33]. Apresentam um desvio padrão considerável mas que se julga aceitável.

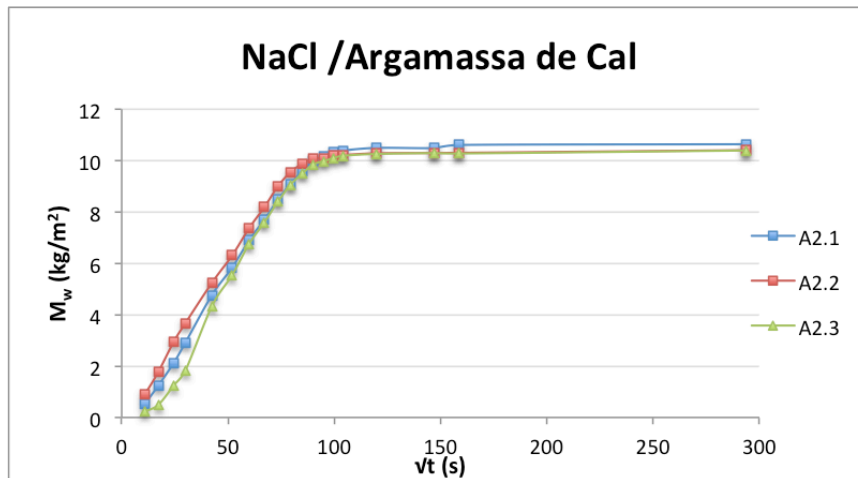


Figura 3.17 –Curvas de absorção capilar dos provetes de argamassa, imersos parcialmente na Solução aquosa cloreto de sódio.

Tabela 3.10 – Coeficiente de capilaridade dos provetes de argamassa, imersos parcialmente na solução aquosa de cloreto de sódio.

Proвете	Coeficiente de Capilaridade ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$)			
	Valor individual	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
A2.1	0,1349	0,1350	0,0040	2,9%
A2.2	0,1390			
A2.3	0,1311			

Os provetes de argamassa de cal com cloreto de sódio apresentam resultados do coeficiente de capilaridade bastante homogêneos, que se traduzem num baixo desvio padrão e num baixo coeficiente de variação. Como se verificou no tijolo, os coeficientes de capilaridade do cloreto de sódio são inferiores aos da água.

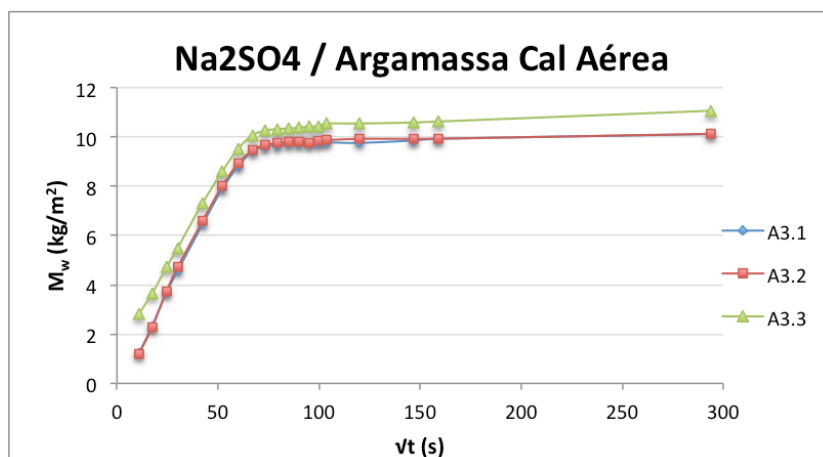


Figura 3.18 –Curvas de absorção capilar dos provetes de argamassa, imersos parcialmente na solução aquosa sulfato de sódio.

Tabela 3.11 – Coeficiente de capilaridade dos provetes de argamassa, imersos parcialmente na solução aquosa de sulfato de sódio

Proвете	Coeficiente de Capilaridade ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$)			
	Valor individual	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
A3.1	0,1675	0,1617	0,0159	9,8%
A3.2	0,1739			
A3.3	0,1437			

No caso do sulfato de sódio, os resultados já são mais dispersos, embora seja clara uma tendência geral. O desvio padrão é o mais alto na argamassa, para todas as soluções testadas, mas o coeficiente de variação, embora elevado, considera-se ainda aceitável.

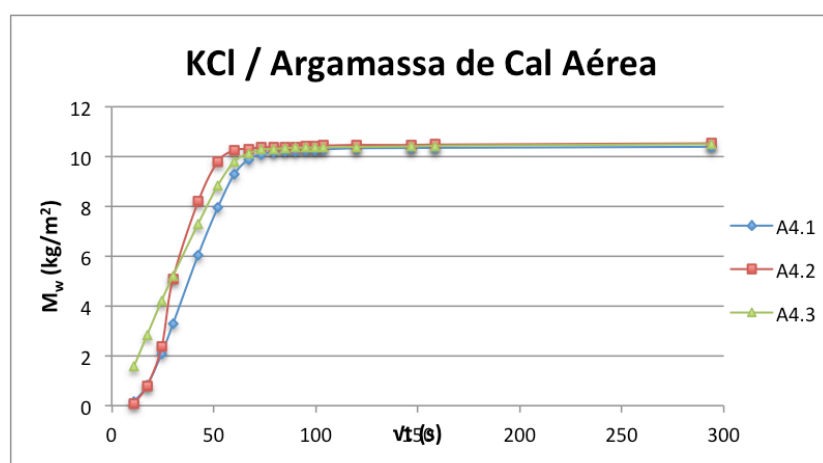


Figura 3.19 –Curvas de absorção capilar dos provetes de argamassa, imersos parcialmente na solução aquosa cloreto de potássio.

Tabela 3.12 – Coeficiente de capilaridade dos provetes de argamassa, imersos parcialmente na solução aquosa de cloreto de potássio

Proвете	Coeficiente de Capilaridade ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$)			Coeficiente de Variação (%)
	Valor individual	Média	Desvio Padrão	
A4.1	0,1915	0,1868*	0,0066*	3,56%*
A4.2	0,2723			
A4.3	0,1821			

*Valores calculados excluindo o resultado do provete A4.2

Os provetes testados na solução de cloreto de potássio apresentam coeficientes de capilaridade algo dispersos, sendo o provete A4.2 o que se afasta mais em relação aos outros dois. Na bibliografia não existem valores que sirvam como orientação mas visto que os provetes A4.1 e A4.3 apresentam resultados próximos, assumiu-se que o coeficiente de capilaridade do provete T4.2 decorreu, como explicado acima, de algum erro experimental ou de algum defeito do provete e não foi considerado no cálculo da média, desvio padrão e coeficiente de variação. Assim, não considerando esse valor verifica-se que tanto o desvio padrão como o coeficiente de variação são baixos. Tal como no tijolo verifica-se que os provetes ensaiados com cloreto de potássio apresentam um coeficiente de capilaridade superior ao da água.

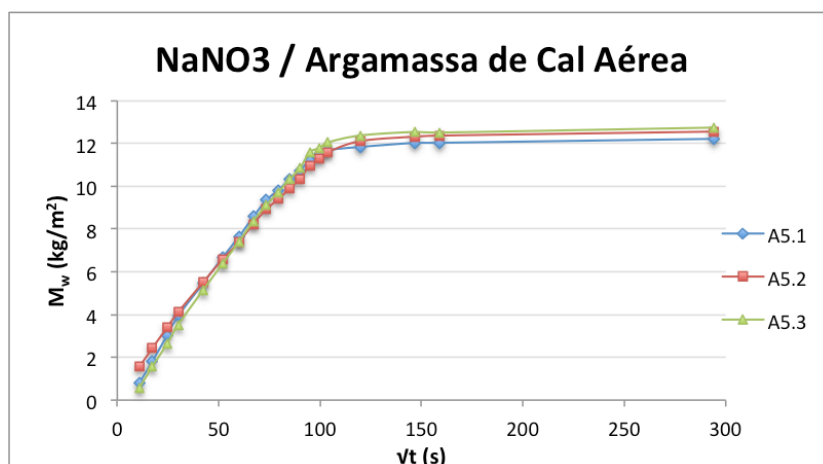


Figura 3.20 –Curvas de absorção capilar dos provetes de argamassa, imersos parcialmente na solução aquosa nitrato de sódio.

Tabela 3.13 – Coeficiente de capilaridade dos provetes de argamassa, imersos parcialmente na solução aquosa de nitrato de sódio

Proвете	Coeficiente de Capilaridade ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$)			
	Valor individual	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
A5.1	0,1496	0,1405	0,0127	9,0%
A5.2	0,1260			
A5.3	0,1458			

No caso dos provetes de argamassa ensaiados na solução de nitrato de sódio pode dizer-se que o valor obtido para o provete A5.2 se afasta um pouco dos outros dois, mas ainda assim conduz a um coeficiente de variação aceitável. Verifica-se que os provetes ensaiados do nitrato de sódio apresentam um coeficiente de capilaridade médio inferior ao da água.

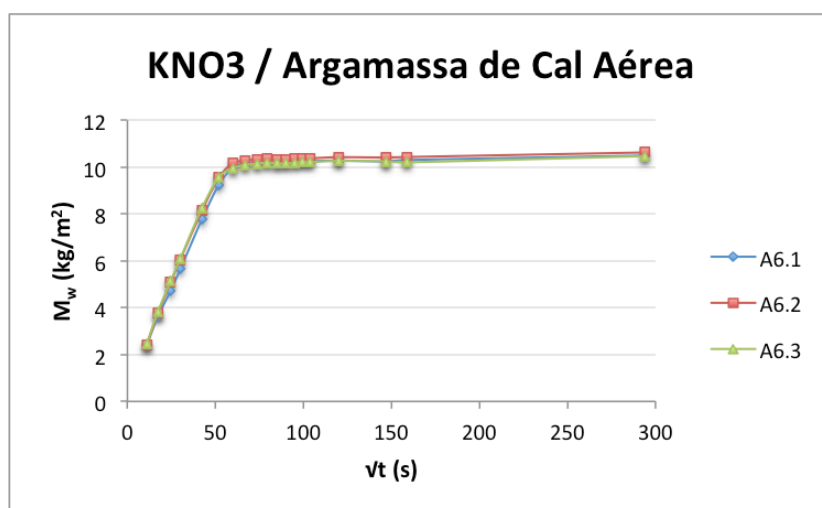


Figura 3.21 –Curvas de absorção capilar dos provetes de argamassa, imersos parcialmente na solução aquosa nitrato de potássio.

Tabela 3.14 – Coeficiente de capilaridade dos provetes de argamassa, imersos parcialmente na solução aquosa de nitrato de potássio

Proвете	Coeficiente de Capilaridade ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$)			
	Valor individual	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
A6.1	0,1686	0,1772	0,0075	4,2%
A6.2	0,1807			
A6.3	0,1822			

Os provetes de argamassa testados na solução aquosa de nitrato de potássio apresentam um coeficiente de variação consideravelmente baixo. Só o provete A6.1 é que mostra um valor do coeficiente de capilaridade um pouco mais baixo mas ainda assim dentro da tendência geral. Verifica-se que, tal como no tijolo, o coeficiente de capilaridade com o nitrato de potássio é superior ao coeficiente de capilaridade médio da água.

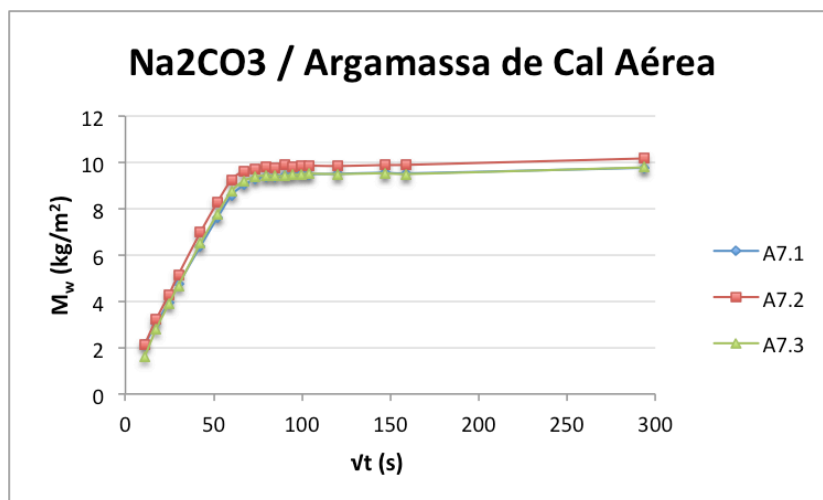


Figura 3.22 –Curvas de absorção capilar dos provetes de argamassa, imersos parcialmente na solução aquosa carbonato de sódio

Tabela 3.15 – Coeficiente de capilaridade dos provetes de argamassa, imersos parcialmente na solução aquosa de carbonato de sódio.

Proвете	Coeficiente de Capilaridade ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$)			
	Valor individual	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
A7.1	0,1345	0,1469	0,0108	7,3%
A7.2	0,1529			
A7.3	0,1534			

Os resultados obtidos são razoavelmente homogêneos, observando-se uma tendência geral apesar do coeficiente de capilaridade do provete A7.1 ser ligeiramente mais baixo. O coeficiente de variação traduz isso mesmo e o desvio padrão também. O carbonato de sódio teve um efeito de diminuição do coeficiente de absorção capilar, como no tijolo.

Comparando com os resultados obtidos no tijolo, chega-se às mesmas conclusões embora as diferenças sejam aqui menos acentuadas. Em relação aos provetes de referência, os provetes de argamassa ensaiados com soluções em que o íon Na^+ está presente, cloreto de sódio, sulfato de sódio, nitrato de sódio e carbonato de sódio, apresentam valores do coeficiente de capilaridade médios inferiores. Já os provetes ensaiados em soluções aquosas com o íon K^+ , como o cloreto de potássio e o nitrato de potássio, apresentam coeficiente de capilaridade médio superior ao dos provetes de referência, como se pode ver na figura 3.23.

As soluções aquosas que apresentam coeficiente de capilaridade mais homogêneo, ou seja, com desvio padrão menor, são a de cloreto de sódio seguindo-se a de cloreto de potássio, depois de se descartar o resultado desviante. A solução que apresenta desvio padrão e coeficiente de variação mais elevados é a de sulfato de sódio, em que os valores obtidos para os três coeficientes de capilaridade apresentavam maior dispersão entre eles.

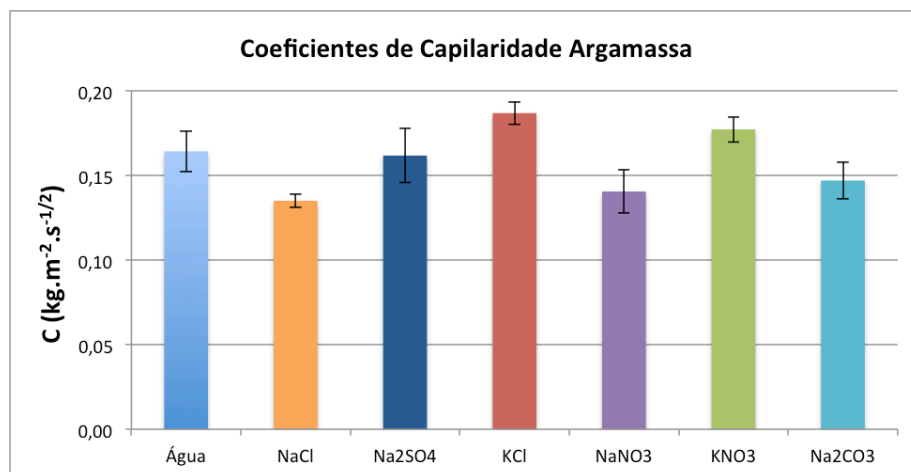


Figura 3.23 – Média e desvio padrão do coeficiente de capilaridade para cada solução na argamassa

Considera-se que o coeficiente de variação abaixo de 10% não é ainda muito elevado. Apesar da dispersão não ser muito baixa em muitos dos casos, obteve-se sempre, tanto nos provetes de tijolo como nos de argamassa, um coeficiente de variação inferior a 10%, e mesmo inferior a 5% em 43% dos casos.

3.3.2.2 Sorvidade

A sorvidade S (m/s^{1/2}) [37] é uma propriedade importante dos materiais de construção que expressa a tendência de um material para absorver e transmitir água ou outros líquidos por capilaridade [19]. Pode ser medida através do ensaio de absorção por capilaridade, correspondendo ao declive da curva que se obtém quando o volume acumulado de líquido absorvido por unidade de volume, i (m), é representando em função da raiz quadrada do tempo.

$$i = \frac{\Delta M}{A \cdot \rho} \quad (3.2)$$

Onde ΔM (kg) é a massa de líquido absorvido acumulada, A (m²) é a área da superfície de absorção e ρ (kg/m³) é a densidade do líquido.

A sorvidade depende tanto do material como do líquido, como mostra a equação 3.3 [19]:

$$S = \left(\frac{\sigma}{\eta} \right)^{1/2} \cdot S \quad (3.3)$$

Em que σ (mN/m) e η (cP) são a tensão superficial e a viscosidade do líquido, respetivamente, e S é a sorvidade intrínseca do material. A equação 3.3 implica que, quando a sorvidade de um dado material é medida usando diferentes líquidos, esses valores devem variar linearmente com $(\sigma/\eta)^{1/2}$.

Como o cálculo da sorvidade depende da massa de água absorvida, assinalaram-se novamente valores desviantes que como seria de esperar, estão vinculados aos provetes de

tijolo T1.2, T3.2 e T5.3. Isto significa que vão influenciar a sorvidade média e por sua vez a aproximação da nuvem de pontos a uma reta. Então, calculou-se a média corrigida, sem esses valores, e obteve-se a regressão linear (tabela 3.16 e figura 3.24).

Tabela 3.16 – Sorvidade do Tijolo em relação à água e às soluções salinas

Família de Provetes	$S \times 10^6 \text{ (m/s}^{1/2}\text{)} \text{ médio}$	$(\sigma / \eta)^{1/2}$
Água	145,29*	8,5238
NaCl	85,48	6,4150
Na ₂ SO ₄	100,42*	6,4307
KCl	143,02	8,7001
NaNO ₃	68,25*	5,6698
KNO ₃	137,19	8,6340
Na ₂ CO ₃	81,62	5,0525

* Sorvidade calculada excluindo o resultado do provete desviante.

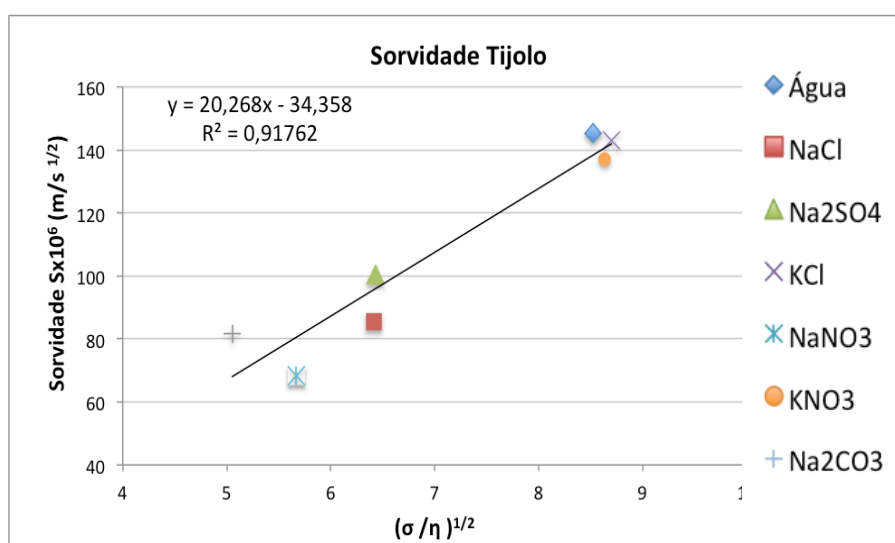


Figura 3.24 –Sorvidade do tijolo representada em função de $(\sigma/\eta)^{1/2}$, com valores corrigidos

Nos provetes de argamassa de cal aérea, verificou-se um provete desviante A4.2 (cloreto de potássio), como já se tinha observado aquando do cálculo do coeficiente de capilaridade, por isso também não foi contabilizado no cálculo da sorvidade média (tabela 3.17 e figura 3.25).

Tabela 3.17 – Sorvidade da Argamassa em relação à água e às soluções salinas

Família de Provetes	$S \times 10^6 \text{ (m/s}^{1/2}\text{)} \text{ médio}$	$(\sigma/\eta)^{1/2}$
Água	164,52	8,5238
NaCl	112,98	6,4150
Na ₂ SO ₄	140,17	6,4307
KCl	159,68*	8,7001
NaNO ₃	103,59	5,6698
KNO ₃	146,02	8,6340
Na ₂ CO ₃	123,98	5,0525

* Sorvidade calculada excluindo o resultado do provete desviante.

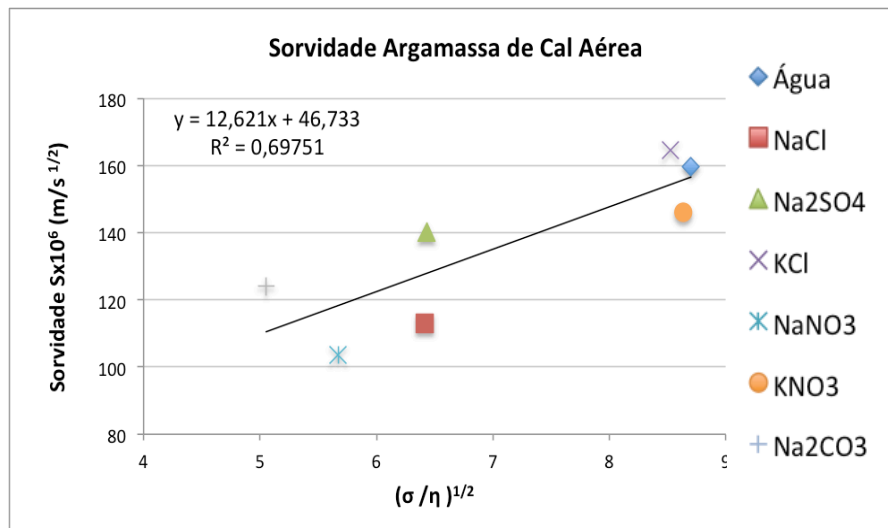


Figura 3.25 – Sorvidade da argamassa representada em função de $(\sigma/\eta)^{1/2}$, com valores corrigidos

3.4. ENSAIO DE SECAGEM

3.4.1. MÉTODO DE ENSAIO

O ensaio de secagem foi baseado no Procedimento nºII.5 “Evaporation Curve” da RILEM 1980 [22]. O ensaio teve como objetivo caracterizar a influência das soluções salinas na secagem do tijolo e da argamassa de cal aérea. No decurso do ensaio de secagem foi também possível observar a evolução da degradação da superfície superior dos provetes, a única face por onde ocorreu a evaporação (figura 3.28).

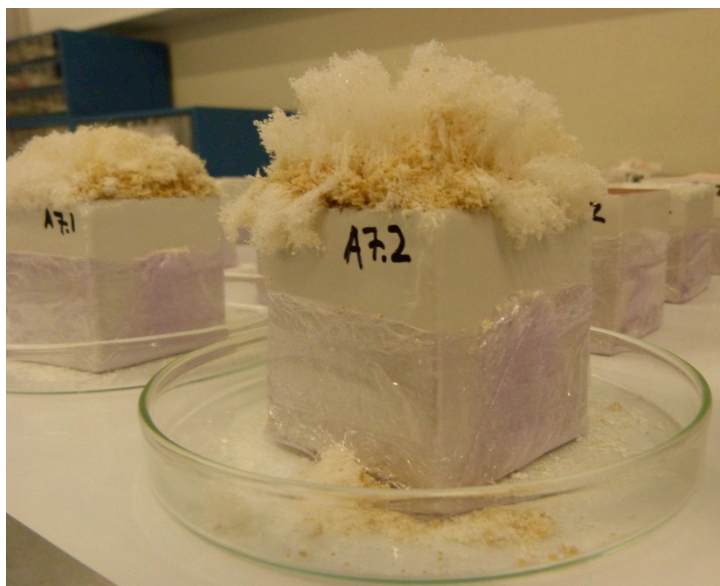


Figura 3.26 – Provette de argamassa de cal aérea imerso na solução de carbonato de sódio degradado durante a segunda semana de secagem.

O ensaio foi realizado sob os mesmos provetes utilizados nos ensaios de capilaridade. A saturação foi obtida, ao fim das 24 horas de absorção capilar, durante as quais os provetes foram mantidos em caixas de plástico fechadas, parcialmente imersos na água e soluções salinas. Como se pode ver nas curvas de absorção capilar (figuras 3.8 a 3.14 e de 3.16 a 3.22) este período foi suficiente para que os provetes atingissem um teor de água próximo da saturação capilar.

Devido à impossibilidade de efetuar pesagens ao fim de semana, os ensaios de capilaridade realizados no final da semana, depois de se atingir a estabilização do peso dos provetes, foram prolongados até ao início da semana seguinte para que não se perdessem os pontos iniciais da secagem.

Logo após retirados da imersão parcial, a face inferior dos provetes foi selada com folha de polietileno para garantir que a secagem seria unidirecional e ocorre apenas pela face superior.

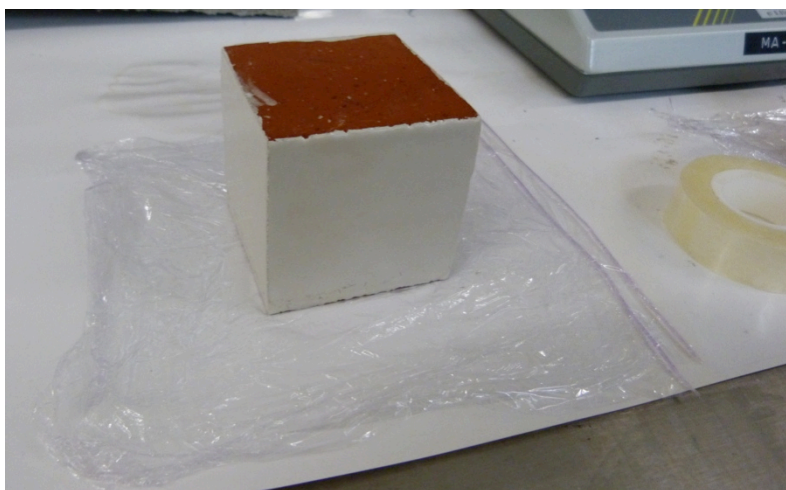


Figura 3.27 – Selagem da base dos provetes com folha de polietileno

O ensaio de secagem decorreu numa sala condicionada, com reduzida velocidade do ar, a 20°C e humidade relativa de 60%, aproximadamente. Os provetes foram dispostos ligeiramente afastados uns dos outros, em cima de uma bancada (figura 3.30).

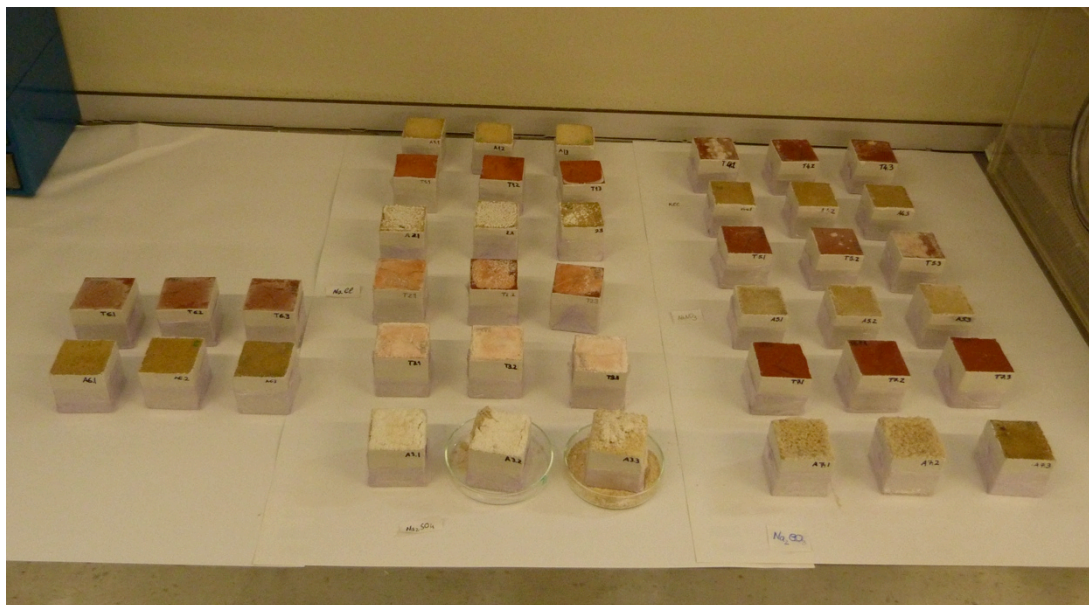


Figura 3.28 –Ensaio de Secagem

Com o objetivo de determinar a quantidade de água evaporada durante a secagem pesaram-se periodicamente os provetes numa balança com resolução de 0,001g. Pesaram-se de 1h em 1h durante as primeiras 8 horas, três vezes por dia até ao final da primeira semana, uma vez por dia durante as duas semanas seguintes (apenas nos dias úteis) e finalmente, uma vez por semana até ao final do ensaio que, em alguns casos foi muito lento.

Alguns ensaios não terminaram a tempo de serem apresentados nesta dissertação, mas vão continuar as pesagens e os resultados completos serão apresentados em publicação a efetuar atempadamente sobre este trabalho,

Os resultados dos ensaios de secagem são quantitativamente expressos pela curva de evaporação e pelo índice de secagem que se abordam, respetivamente, nas secções 3.4.2.1 e 3.4.2.2 e qualitativamente, também pela tipologia de degradação, que se registou fotograficamente e cujos resultados se apresentam também na secção 3.4.2.1.

3.4.2. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.4.2.1 Curva de secagem e tipologia de degradação

A curva de evaporação expressa o teor de água do provete em função do tempo. O teor de água é habitualmente calculado em percentagem de massa seca,

$$W_i = \frac{M_i - M_{seca}}{M_{seca}} \times 100 \text{ [%]} \quad (3.4)$$

Em que W_i é o teor de água (%), m_i a massa (g) do provete no instante t_i e m_{seca} é a massa (g) do provete seco em estufa, antes do início dos ensaios. Às massas foram descontados os valores referentes à resina impermeabilizante e à folha de polietileno.

Apresentam-se, em seguida, as curvas de secagem do tijolo e da argamassa e fotografias dos respectivos provetes.

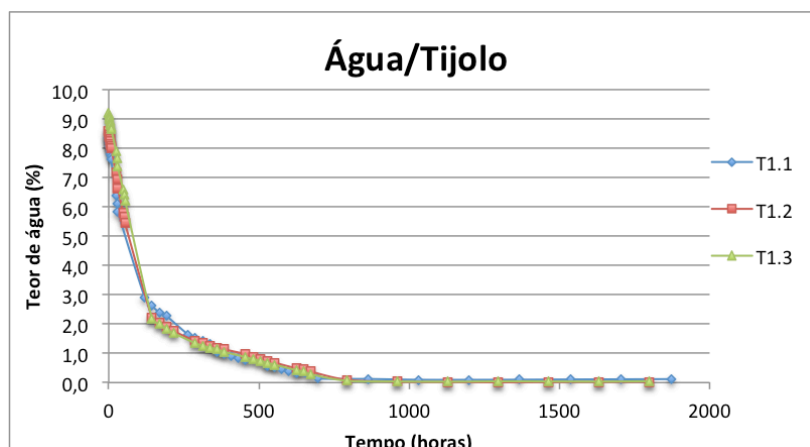


Figura 3.29 –Curvas de secagem dos provetes de tijolo imersos em água.

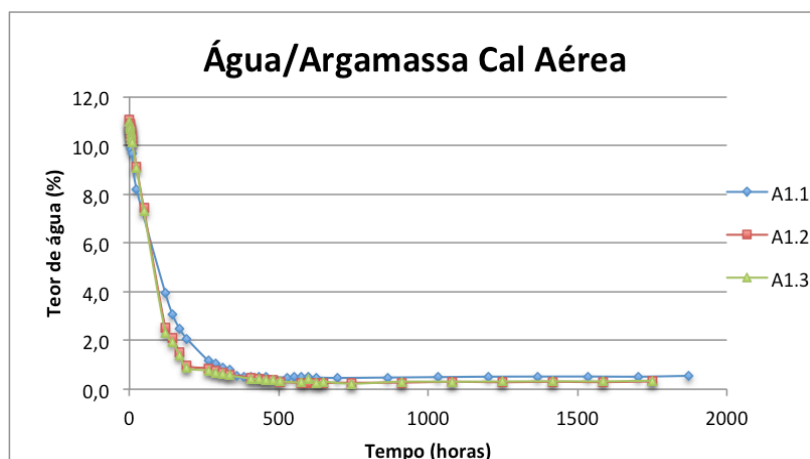


Figura 3.30 –Curvas de secagem dos provetes de argamassa imersos em água.



Figura 3.31 –Pormenor da secagem dos provetes de argamassa e tijolo imersos em água, 11ª semana de secagem.

Os provetes não apresentam alterações visíveis. O provete T1.3 apresenta ligeiras eflorescências provavelmente devido a sais contidos no tijolo.

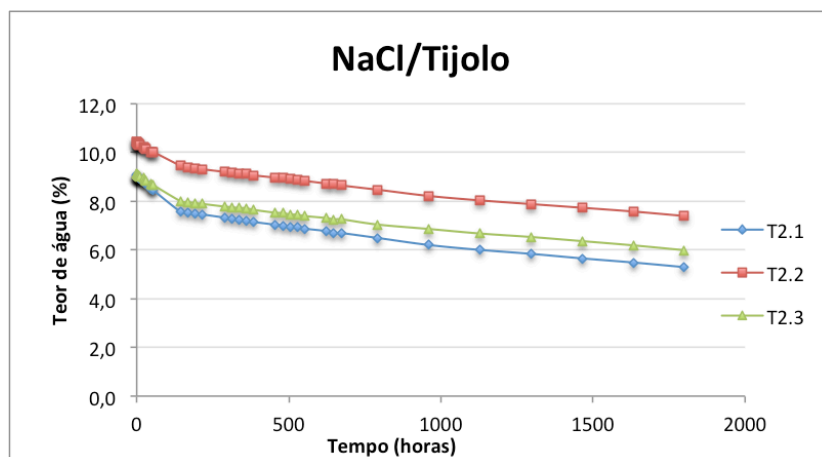


Figura 3.32 –Curvas de secagem dos provetes de tijolo imersos em solução aquosa de cloreto de sódio.

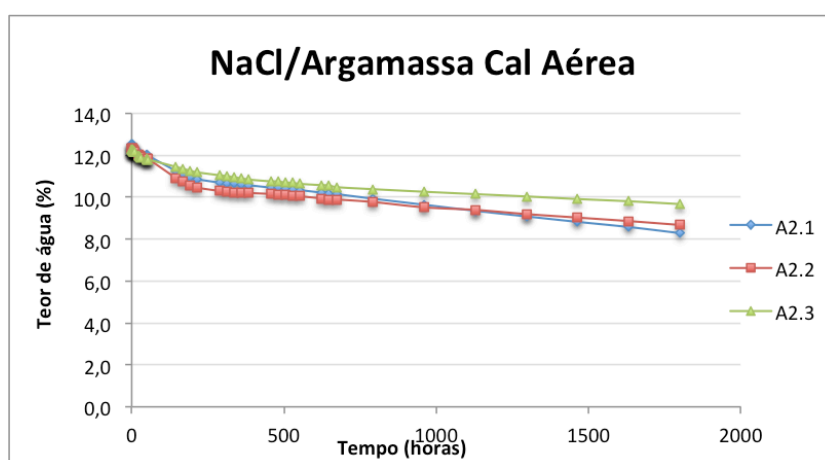


Figura 3.33 –Curvas de secagem dos provetes de argamassa imersos em solução aquosa de cloreto de sódio.



Figura 3.34 –Pormenor da secagem dos provetes de argamassa e tijolo imersos em solução aquosa de cloreto de sódio, 11ª semana de secagem.

Os provetes de tijolo apresentam uma crosta vítrea compacta a cobrir praticamente toda a face. Os provetes de argamassa apresentam eflorescências com uma textura granular que cobrem toda a face dos provetes A2.1 e A2.2 e parcialmente a face do provete A2.3, este é o provete que seca mais devagar.

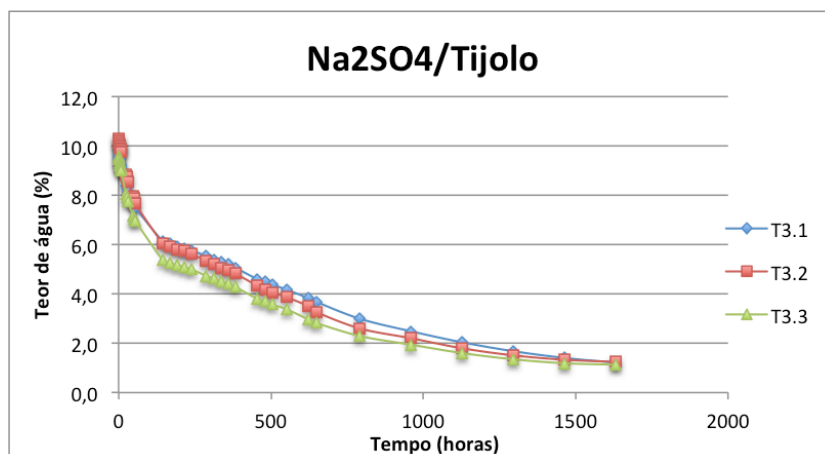


Figura 3.35 –Curvas de secagem dos provetes de tijolo imersos em solução aquosa de sulfato de sódio.

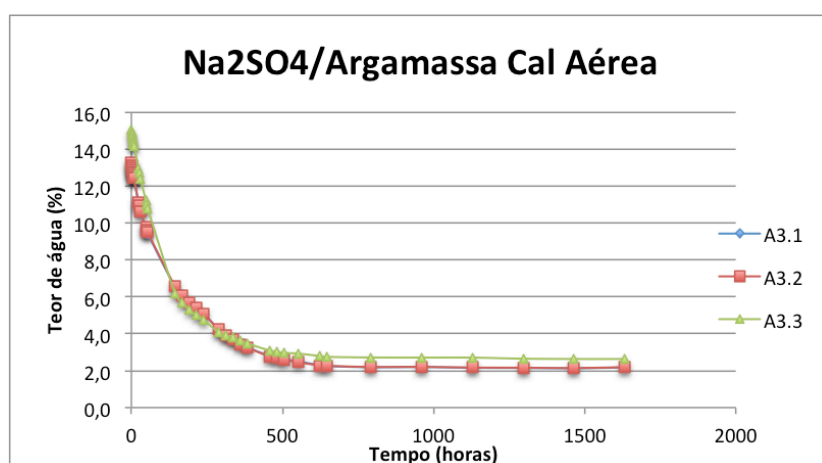


Figura 3.36 –Curvas de secagem dos provetes de argamassa imersos em solução aquosa de sulfato de sódio.

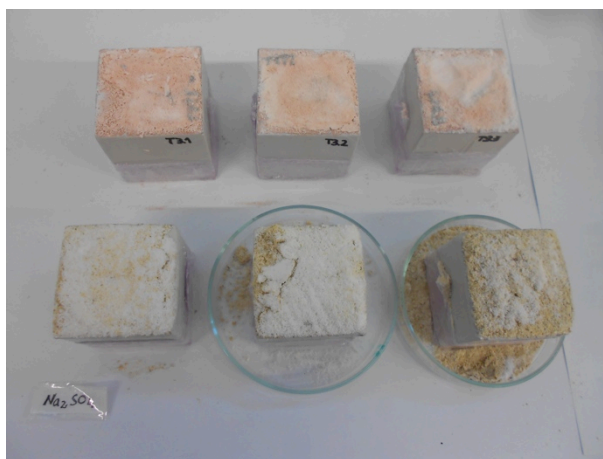


Figura 3.37 –Pormenor da secagem dos provetes de argamassa e tijolo imersos em solução aquosa de sulfato de sódio, 10ª semana de secagem.

Os provetes de tijolo apresentam pulverulência em toda a face. Os provetes de argamassa apresentam arenização com total desagregação e perda de material nos provetes A3.2 e A3.3. Apesar desta diferença, as curvas de secagem dos três provetes são semelhantes. O sulfato de sódio tem uma ação mais destrutiva em ambos os materiais do que o cloreto de sódio.

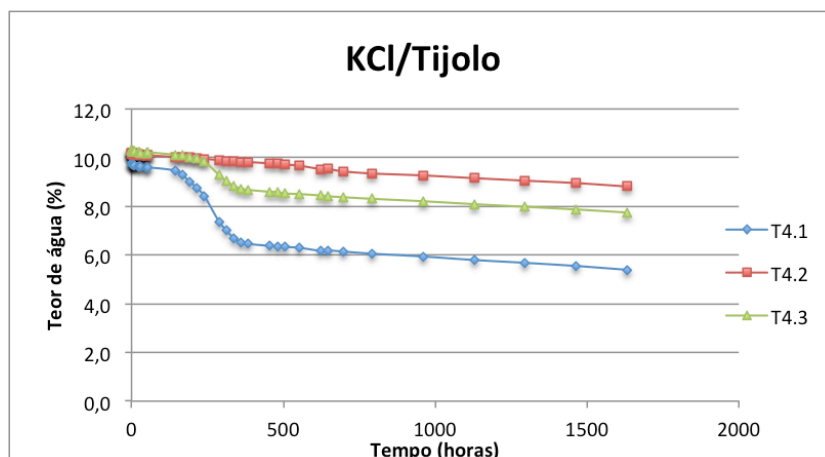


Figura 3.38 –Curvas de secagem dos provetes de tijolo imersos em solução aquosa de cloreto de potássio.

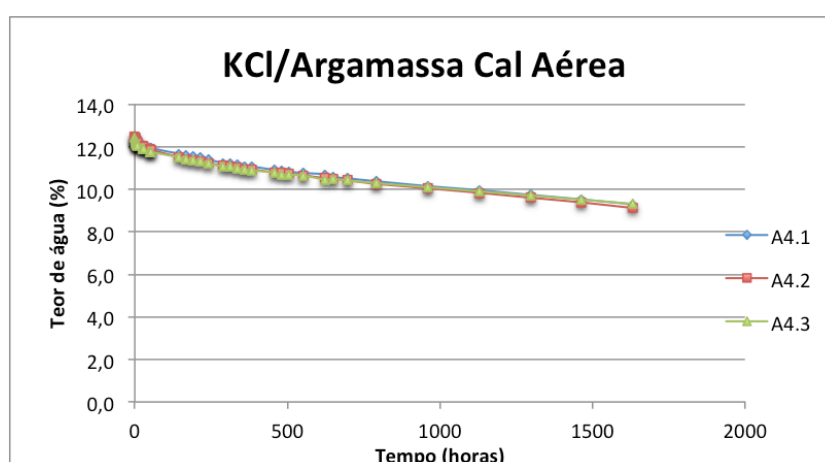


Figura 3.39 –Curvas de secagem dos provetes de argamassa imersos em solução aquosa de cloreto de potássio.

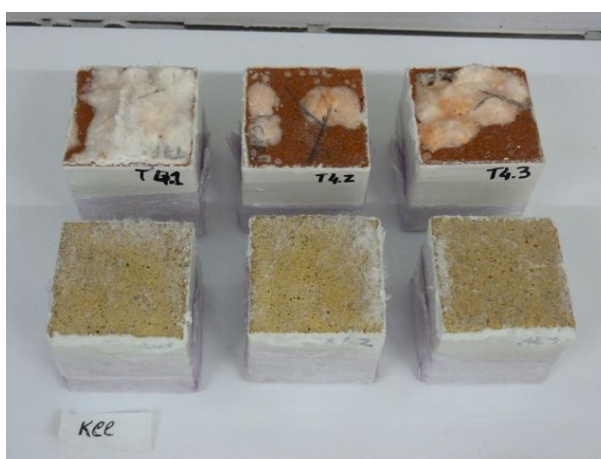


Figura 3.40 –Pormenor da secagem dos provetes de argamassa e tijolo imersos em solução aquosa de cloreto de potássio, 10ª semana de secagem.

Os provetes de tijolo apresentam uma crosta de eflorescências empolada em vários pontos, esta cobre toda a face no provete T4.1. Já os provetes de argamassa exibem uma cobertura tipo ‘bigodes de gato’ muito finos, que não são muito perceptíveis nestas fotografias. Este tipo de degradação não se assemelha a nenhuma das anteriores.

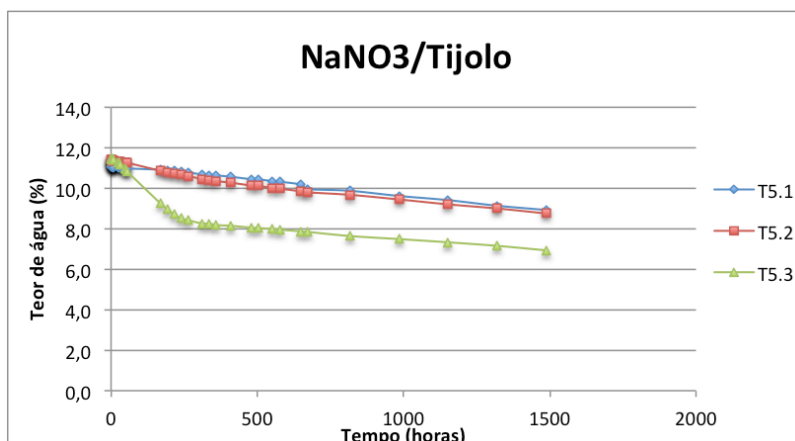


Figura 3.41 –Curvas de secagem dos provetes de tijolo imersos em solução aquosa de nitrato de sódio.

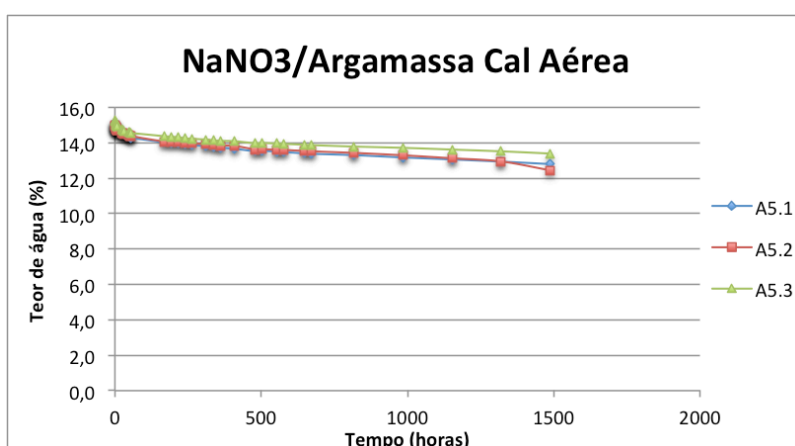


Figura 3.42 –Curvas de secagem dos provetes de argamassa imersos em solução aquosa de nitrato de sódio.



Figura 3.43 –Pormenor dos provetes de argamassa e tijolo imersos em solução aquosa de nitrato de sódio, 9ª semana de secagem.

Os provetes de tijolo apresentam manifestações diferentes, o T5.1 e T5.2 apresentam uma crosta cristalina que cobre toda a face e o T5.3 apresenta uma crosta cristalina mais densa que se desenvolve verticalmente. Os provetes de argamassa apresentam eflorescências que cobrem toda a face. Este tipo de degradação é a que mais se assemelha à do cloreto de sódio.

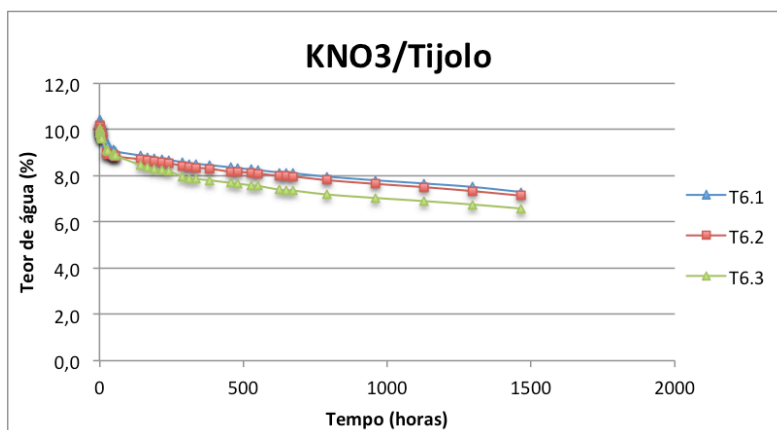


Figura 3.44 –Curvas de secagem de tijolo dos provetes imersos em solução aquosa de nitrato de potássio.

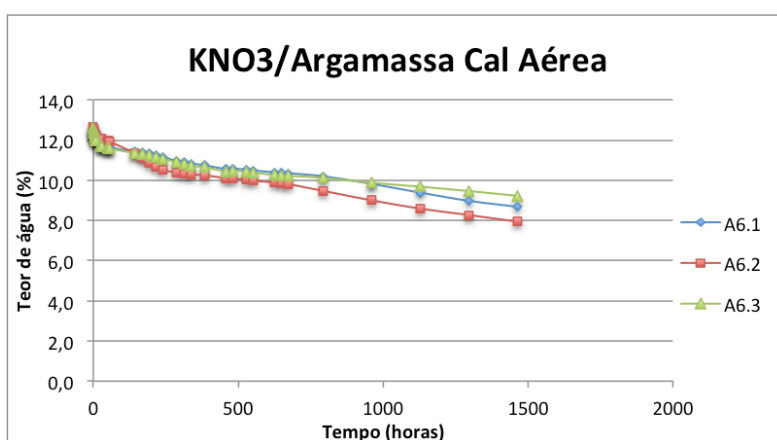


Figura 3.45 –Curvas de secagem dos provetes de argamassa imersos em solução aquosa de nitrato de potássio.



Figura 3.46 –Pormenor dos provetes de argamassa e tijolo imersos em solução aquosa de nitrato de potássio, 9ª semana de secagem.

Os provetes de tijolo exibem um padrão de degradação mais homogêneo, têm as faces cobertas por uma crosta salina com uma textura que lembra algodão. Na argamassa o provete A6.1 manifesta uma ligeira eflorescência que não cobre toda a face, já o provete A6.2 é o mais degradado, apresentando eflorescências tipo ‘couve-flor’. O provete A6.3 apresenta manchas escuras de humidade.

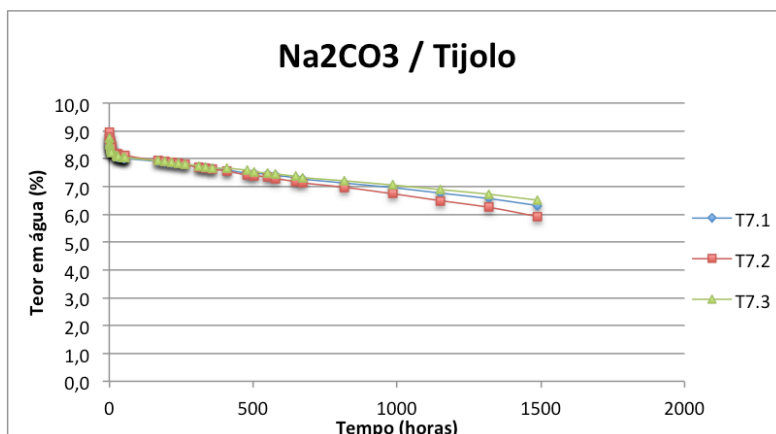


Figura 3.47 –Curvas de secagem dos provetes de tijolo imersos em solução aquosa de carbonato de sódio.

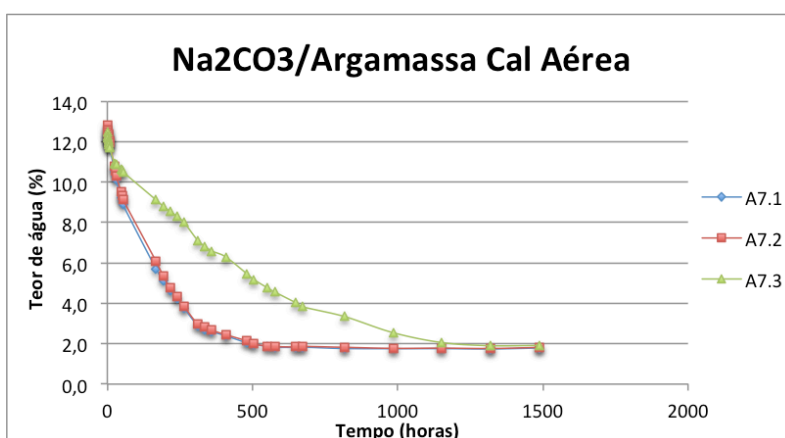


Figura 3.48 –Curvas de secagem dos provetes de argamassa imersos em solução aquosa de carbonato de sódio.

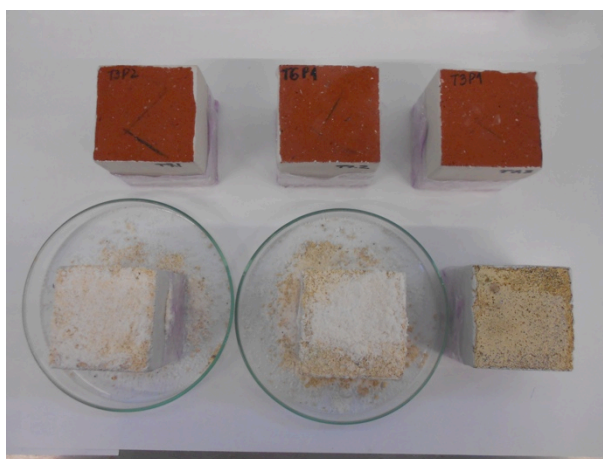


Figura 3.49 –Pormenor da secagem dos provetes de argamassa e tijolo imersos em solução aquosa de carbonato de sódio, 9ª semana de secagem.

Os provetes de tijolo não apresentam degradação visível. Os provetes de argamassa A7.1 e A7.2 revelam uma total desagregação da argamassa, com perda de material, chamada arenização. O provete A7.3 apresenta manchas de humidade. A degradação dos provetes de argamassa assemelha-se à degradação do sulfato de sódio.

3.4.2.2 Cálculo do índice de secagem

O índice de secagem é determinado pela equação :

$$I.S. = \frac{\int_{t_0}^{t_i} f(w_i) \times dt}{W_0 \times t_i} \quad (3.5)$$

Em que $f(w_i)$ expressa a variação do teor de água (%) do provete em função do tempo, W_0 é o teor de água inicial (%) e t_i é o tempo total do ensaio (h).

O índice de secagem é na prática uma relação de áreas da curva de secagem, como se mostra na figura 3.52:

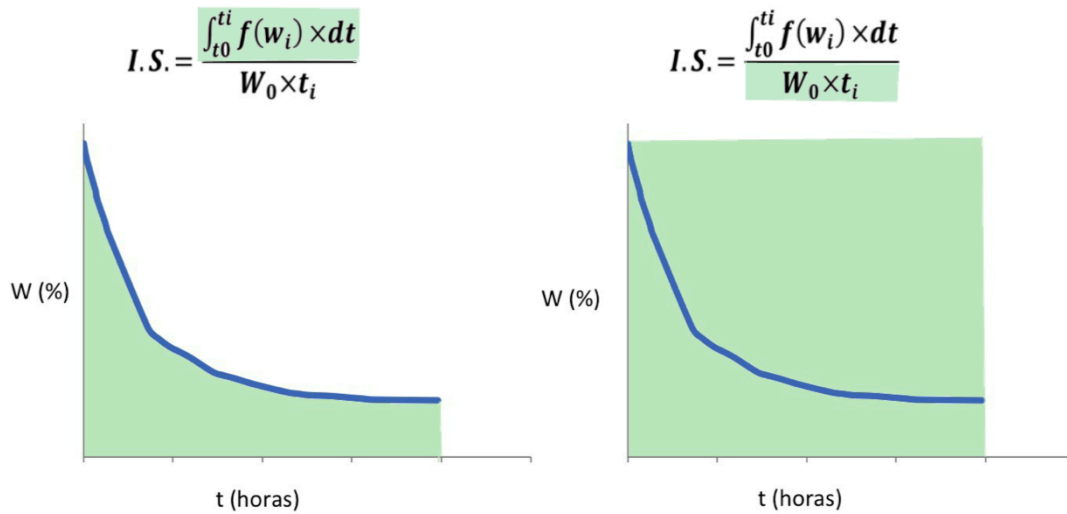


Figura 3.50 –Relação entre áreas no cálculo do índice de secagem.

De acordo com a Normal 29/88 [38], o primeiro passo é determinar o tempo de secagem, t_i , que corresponde ao momento em que a curva de evaporação se torna horizontal, o que acontece quando a equação 3.6 é respeitada:

$$1,0 \geq \frac{m_0 - m_{i-1}}{m_0 - m_i} \geq 0,90 \quad (3.6)$$

Onde m_0 é a massa (em gramas) do provete no instante t_0 (em horas), m_{i-1} é a massa do provete no instante t_{i-1} e m_i é a massa do provete no instante t_i .

Verificou-se, contudo, que este critério nem sempre é coerente com o troço horizontal da curva pelo que tem vindo a ser adaptado por outros autores. Brito [21] considerou que a curva de secagem se torna horizontal quando:

$$\frac{m_i - m_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \leq 0,05 \quad (3.7)$$

Onde m_i (em gramas) é a massa do provete no instante t_i (em horas), m_{i-1} é a massa do provete no instante anterior a t_i , t_{i-1} .

De acordo com a Normal, quando se pretende comparar vários materiais, deverá considerar-se o mesmo tempo final de ensaio para todos, ou seja, o tempo final correspondente ao

material que demorou mais tempo a secar. A norma não considera a possibilidade de testar o mesmo material com diferentes soluções salinas. Considera contudo a possibilidade de testar um determinado material antes e após tratamento (hidrófugos, consolidantes , etc.) e, para esse caso, refere que se deve considerar o tempo final do material antes do tratamento. Fazendo uma analogia com o caso dos sais, resolveu nesta dissertação considerar-se o tempo final do material não contaminado com sal, ou seja, com água pura. Nesse caso já se poderia calcular o índice de secagem para todos os provetes, mesmo para os que ainda não secaram, porque se consideraria o tempo de secagem dos provetes imersos em água. O que se faz habitualmente na prática [33] é utilizar o tempo final da solução que demorou mais a secar. Mas, pelas razões acima explicadas, também é defensável calcular o índice de secagem utilizando o tempo final do ensaio realizado com água.

Como a norma não contempla a secagem com soluções salinas, não é estranho que não esteja bem adaptada a esses processos mais lentos. Optou-se por não se aplicar o critério que Brito utilizou porque também se verificou que poderia conduzir a valores não coerentes com o troço horizontal da curva, uma vez que a diferença entre pesagens é muito pequena quando se estudam sais. Para afinar o critério da equação 3.6 encurtou-se o intervalo da para 0,999;1,000.

Os tempos de secagem para os provetes de tijolo e argamassa imersos em água estão representados na tabela 3.18.

Tabela 3.18 – Tempos de secagem, em horas, dos provetes de argamassa e tijolo no ensaio com água.

Provetes Tijolo	Valor individual	Média	Provetes Argamassa	Valor individual	Média	Tempo de secagem final
T1.1	864	816	A1.1	408	408	816
T1.2	792		A1.2	408		
T1.3	792		A1.3	408		

Considerando o tempo de secagem dos provetes imersos em água e o material que demorou mais a secar, obteve-se um tempo de secagem final de 816 horas.

O índice de secagem de todos os provetes está apresentado na tabela 3.19:

Tabela 3.19 – Índice de secagem dos provetes.

	Provetes Tijolo	I.S.	Provetes Argamassa	I.S.
Água	T1.1	0,188	A1.1	0,167
	T1.2	0,192	A1.2	0,132
	T1.3	0,183	A1.3	0,129
NaCl	T2.1	0,774	A2.1	0,830
	T2.2	0,848	A2.2	0,819
	T2.3	0,819	A2.3	0,866
Na ₂ SO ₄	T3.1	0,512	A3.1	0,321
	T3.2	0,463	A3.2	0,320
	T3.3	0,441	A3.3	0,304
KCl	T4.1	0,730	A4.1	0,864
	T4.2	0,931	A4.2	0,854
	T4.3	0,855	A4.3	0,858
NaNO ₃	T5.1	0,948	A5.1	0,907
	T5.2	0,908	A5.2	0,921
	T5.3	0,748	A5.3	0,925
KNO ₃	T6.1	0,791	A6.1	0,838
	T6.2	0,794	A6.2	0,803
	T6.3	0,766	A6.3	0,828
Na ₂ CO ₃	T7.1	0,868	A7.1	0,322
	T7.2	0,845	A7.2	0,299
	T7.3	0,873	A7.3	0,526

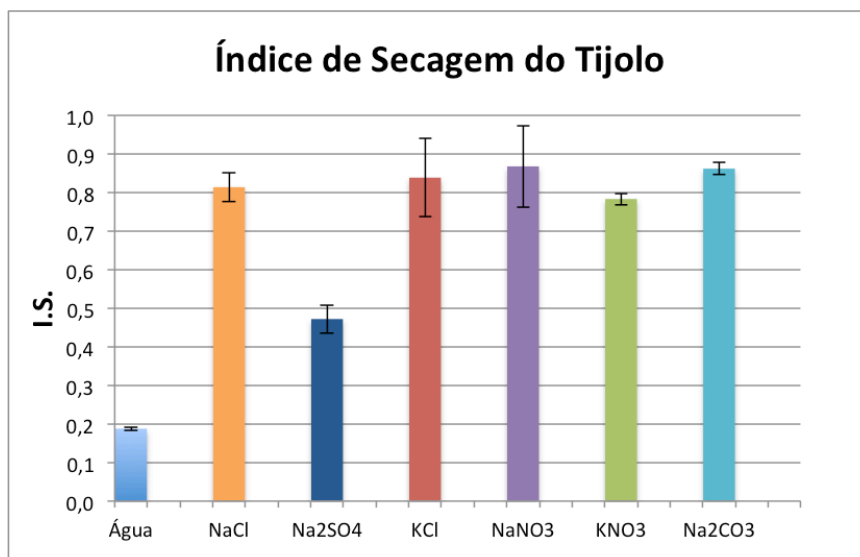


Figura 3.51 – Índice de secagem médio e respetivo desvio padrão, do tijolo para cada solução salina.

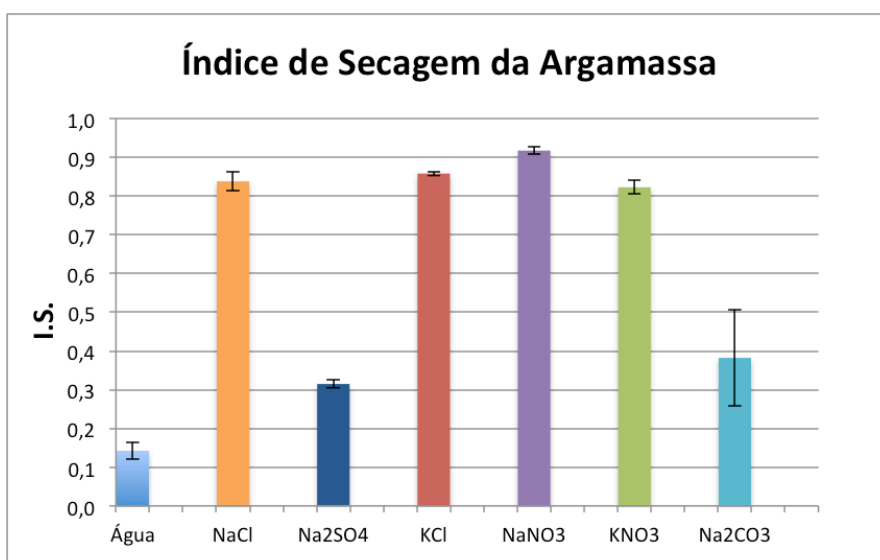


Figura 3.52 – Índice de secagem médio e respetivo desvio padrão, da argamassa para cada solução salina.

Verifica-se que, para ambos os materiais, os provetes imersos em água apresentam um índice de secagem mais baixo, ou seja, secam mais rápido, seguindo-se os provetes imersos na solução sulfato de sódio. São as duas únicas famílias de provetes em que os materiais já secaram à data de redação desta tese. No caso do carbonato de sódio, os provetes de argamassa estão secos mas os de tijolo ainda não, como se pode ver nas figuras 3.51 e 3.52, os provetes A7.1 e A7.2 estão desintegrados o que pode ter conduzido a uma secagem mais rápida. Os restantes provetes ainda se encontram em processo de secagem. Os provetes de tijolo e argamassa apresentam ritmos de secagem diferentes, sendo que, no geral, os provetes de argamassa secam mais rápido.

3.5. ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS

3.5.1. INFLUÊNCIA DOS SAIS NO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO CAPILAR

O ensaio de absorção permitiu avaliar a influência do tipo de sal no coeficiente de capilaridade.

Relativamente aos valores obtidos com água pura, para o tijolo de $0,1448 \text{ kg/m}^2/\text{s}^{1/2}$ e para a argamassa de $0,1642 \text{ kg/m}^2/\text{s}^{1/2}$ (Tabela 3.2 e 3.9), verifica-se que são um pouco superiores aos obtidos por Gonçalves *et al* [33] que foram de $0,13 \pm 0,1 \text{ kg/m}^2/\text{s}^{1/2}$ para os dois materiais. No entanto, estes autores usaram provetes cúbicos mais pequenos, com cerca de 2,4 cm de lado. Já nos estudos realizados por S. Couto [31] sobre tijolo e por V. Brito [21] sobre argamassa de cal aérea e, utilizando os mesmos materiais desta tese e provetes semelhantes, com dimensões de 5 cm x 5 cm x 5 cm, o coeficiente de absorção de água por capilaridade foi e de $0,16 \text{ kg/m}^2/\text{s}^{1/2}$ para o tijolo e de $0,18 \text{ kg/m}^2/\text{s}^{1/2}$ para a argamassa. Apesar de estes valores serem um pouco superiores aos obtidos neste trabalho, também se verifica que o coeficiente de capilaridade é superior para a argamassa.

Observou-se um coeficiente de capilaridade mais baixo para os sais que contêm o ião sódio do que para os que contem potássio, em relação à água (figuras 3.15 e 3.23). Obtiveram-se também resultados diferentes para os provetes de tijolo e de argamassa, sendo os coeficientes de capilaridade um pouco mais altos para os provetes de argamassa (figuras 3.15 e 3.23).

No presente estudo existem alguns casos em que o comportamento de alguns provetes se afasta do comportamento dos restantes da mesma ‘família’, talvez por heterogeneidades estruturais ou por algum desvio decorrido durante o ensaio (Tabelas 3.2, 3.4, 3.6 e 3.12). No caso do tijolo com água vê-se facilmente que, não considerando o provete desviante, o valor do coeficiente de capilaridade está de acordo com os obtidos por outros autores anteriormente referidos [31] [33], para o mesmo material. Assume-se então que o mesmo ocorre no tijolo nos casos do sulfato de sódio e do nitrato de sódio, e na argamassa no caso do cloreto de potássio. Por esta razão, optou-se por não considerar esses valores desviantes, mesmo com a inerente desvantagem de reduzir a dimensão da amostra.

A sorvidade foi representada em função de $(\sigma/\eta)^{1/2}$ para cada material (figuras 3.24 e 3.35). De acordo com a teoria [19] as duas quantidades têm uma relação linear se estivermos em presença de materiais inertes completamente molhados pelo líquido (o que acontece quando o ânulo de contacto é nulo) e que não sofreram alterações microestruturais durante a absorção [19].

Das figuras 3.24 e 3.25, conclui-se que há de facto uma variação linear da sorvidade com $(\sigma/\eta)^{1/2}$, tal como previsto teoricamente [27]. Esta variação linear da sorvidade com $(\sigma/\eta)^{1/2}$ está de acordo com as conclusões de outros autores, Espinosa-Scherer e Brito e Gonçalves [28] [29] que observaram o mesmo, embora para um número muito mais limitado de soluções salinas (cloreto de sódio, nitrato de sódio e sulfato de sódio). No entanto, para nenhum dos materiais estudados neste trabalho essa correlação é tão boa como a encontrada por Brito e Gonçalves, em que se analisou a sorvidade de 3 materiais de construção, Pedra de Ançã, outro calcário nacional menos poroso (que se designou “calcário cinza”) e arenito Bentheimer, imersos parcialmente em água e dois sais, cloreto de sódio e nitrato de sódio, obtiveram-se correlações lineares muito boas, todas com coeficiente de determinação superior a 0,95 (figura 3.53) [29]. Isso pode dever-se em parte a uma maior heterogeneidade dos materiais aqui analisados. A correlação obtida no presente trabalho é melhor para o tijolo ($R^2=0,9176$) do que para a argamassa ($R^2=0,6975$). O tijolo, por exemplo, possui fissuras, tal como comprovado por S. Couto [31], que utilizou este mesmo tijolo para testar a ação de

hidrófugos de superfície. Também é provável que o método experimental desta tese tenha experimentado flutuações, de que os valores claramente desviantes indicados nas Tabelas 3.2, 3.4, 3.6 e 3.12, são exemplos extremos.

Analizando a sorvidade em relação aos resultados desviantes obtidos para o coeficientes de capilaridade, verifica-se que eles correspondem a pontos afastados da linha de tendência, que vão contribuir para um coeficiente de correlação linear muito baixo. Excluindo esses pontos (figuras 3.24 e 3.25), obtém-se uma correlação linear que está de acordo com o que se espera da teoria. Em relação à argamassa o coeficiente de determinação R^2 é baixo, de 0,6975, mas vê-se claramente que existe uma tendência linear (figura 3.25). Este material não acompanha tão bem o esperado da teoria, talvez pela heterogeneidade do material, por fatores experimentais ou até mesmo por não se cumprirem totalmente os pressupostos teóricos para a argamassa de cal aérea. Estes pressupostos são que os materiais são inertes e completamente molhados pelo líquido e que não sofreram alterações microestruturais durante a absorção mas, não se sabe se sofreram alterações químicas ou microestruturais durante a absorção, devido ao sal, uma vez que a argamassa de cal aérea é muito frágil.

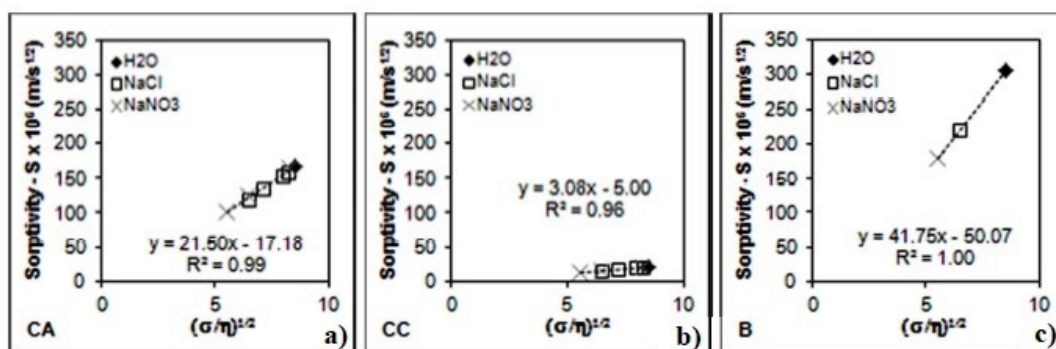


Figura 3.53 –Sorvidade representada em função de $(\sigma/\eta)^{1/2}$ para: a) Pedra de Ançã; b) calcário cinza; c) arenito Bentheimer [29] .

3.5.2. RELAÇÃO ENTRE A DEGRADAÇÃO DO MATERIAL COM O TIPO DE SAL

A ação destrutiva dos sais solúveis depende muito da estrutura porosa e resistência mecânica dos materiais porosos.

De acordo com Brito e Gonçalves [29] a morfologia das eflorescências é similar para o cloreto de sódio e para o nitrato de sódio, contudo varia significativamente com o tipo de pedra (arenito de Bentheimer, pedra de Ançã e um calcário português muito poroso). Isto indica que não existe propriamente um padrão de degradação para cada tipo de sal em determinadas condições ambientes porque essa degradação depende também muito do material. Isso também se pôde observar no presente trabalho, onde a degradação ocorrida no decurso da secagem nem sempre foi semelhante para o tijolo e a argamassa de cal (figuras 3.31, 3.34, 3.37, 3.40, 3.43, 3.46 e 3.49):

- Água: não há alterações visíveis nem no tijolo nem na argamassa, apenas uma eflorescência muito ligeira num dos provetes de tijolo, provavelmente devido a sal contido neste material (figura 3.31);
- Cloreto de sódio: nos provetes de tijolo formou-se uma crosta vítrea que cobre quase toda a sua face superior, enquanto e nos provetes de argamassa se formaram-se eflorescências brancas com textura granular (figura 3.34);

- Sulfato de sódio: foi o sal mais arrasador para os dois materiais; ambos os tipos de provetes mostraram desintegração e pulverulência ou arenização, sendo a argamassa o caso mais grave, em que os provetes se desintegraram de tal forma que perderam massa (figura 3.37);
- Cloreto de potássio: os provetes de tijolo apresentam uma crosta cristalina densa com empolamento sendo a mais grave do provete T4.1 que cobre quase toda a face; o provete T4.2 é o mais são e o provete T4.3 apresenta crosta em metade da face e o empolamento não é tão proeminente como no primeiro caso; já os provetes de argamassa apresentam eflorescências do tipo ‘bigodes de gato’ (Figura 3.54), pois parecem uns fios muito finos, a cobrir a face (figura 3.40);

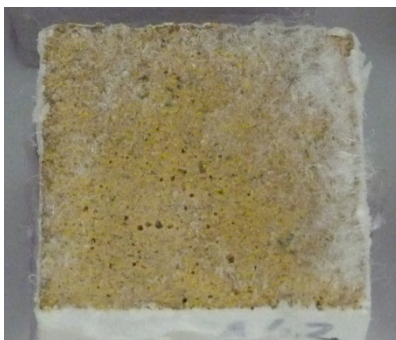


Figura 3.54 – Degradação do provete A4.2 , eflorescências tipo ‘bigodes de gato’.

- Nitrato de sódio: os provetes de tijolo T5.1 e T5.2 apresentam uma crosta cristalina compacta e dura que cobre toda a face, enquanto o provete T5.3 desenvolve a essa crosta verticalmente; os provetes de argamassa estão cobertos por eflorescências do tipo granular (figura 3.43);
- Nitrato de potássio: os provetes de tijolo possuem uma crosta salina cuja textura se assemelha a algodão (Figura 3.55) ; os provetes de argamassa A6.1 apresenta depósitos salinos de aparência amorfa que só começaram a aparecer por volta da sexta semana de secagem, o provete A6.2 apresenta alguns nódulos tipo couve-flor e alguns depósitos salinos idênticos ao provete anterior mais recentes (Figura 3.54) , já o provete A6.3 de argamassa apresentou apenas um ligeiro véu salino (figura 3.46);



Figura 3.55 – Degradação do provete T6.2 , eflorescência tipo algodão.



Figura 3.56 – Degradação do provete A6.2 , nódulos tipo couve flor

- Carbonato de sódio: os provetes de tijolo não apresentam nenhuma alteração mas os de argamassa degradaram-se de forma parecida com a do sulfato de sódio (forte arenização, com perda de material), exceto o provete A7.3 que permaneceu em bom estado (figura 3.49).

No decorrer da secagem apurou-se que os provetes de argamassa apresentam um maior nível de degradação que os de tijolo, pois são mais frágeis.

3.5.3. INFLUÊNCIA DOS SAIS NA CINÉTICA DE SECAGEM

A secagem dos materiais contaminados com sais foi muito lenta, encontrando-se ainda em curso para alguns provetes após mais de dois meses.

Os provetes ensaiados com água foram os mais rápidos a secar. Os provetes imersos em sulfato de sódio foram os mais rápidos a secar dos sais, talvez porque a humidade relativa de equilíbrio deste sal é 96% , logo é muito próxima à da água. A H.R. do ar ambiente é cerca de 60%, por isso, estabelece-se um gradiente de pressão entre o material e o ar que o rodeia, da maior H.R. para a menor H.R., favorável à evaporação de líquido contido nos provetes,.

Em alguns casos, nomeadamente, no cloreto de potássio e carbonato de sódio, observam-se curvas de secagem que revelam um comportamento diferente à secagem no tijolo e na argamassa, como se pode ver nas figuras 3.38, 3.39, 3.47 e 3.48 e através dos índices de secagem representados na tabela 3.19.

Espinosa-Marzal e Scherer [28] , num estudo sobre o bloqueio dos poros por cristalização de sais, num calcário específico, constata que as amostras saturadas com água demoraram cerca de 14 dias a secar e que as amostras saturadas com uma solução de sulfato de sódio atingiram um peso constante ao fim de 28 dias, em contraste com a amostras saturadas com soluções de cloreto de sódio e sulfato de magnésio secaram mais devagar, demorando cerca de três meses. As condições ambientes em que decorreu o ensaio de secagem do estudo de Espinoza-Marzal e Scherer são H.R. 32% e 21°C. Estes resultados vão de encontro aos resultados deste trabalho: apesar de os provetes utilizados neste trabalho serem maiores, de as condições ambientes em que decorreram os dois ensaios serem diferentes e do facto de os materiais também serem diferentes, a ordem pela qual atingiram peso constante é a mesma, considerando só a água, o cloreto de sódio e o sulfato de sódio. É natural que a secagem seja mais rápida no estudo de Espinoza e Scherer porque a H.R. do ar é baixa e por isso gerou-se um fluxo favorável à secagem dos provetes.

Em quase todos os casos, principalmente para a argamassa, as curvas de secagem têm o mesmo andamento e existe uma dispersão pequena entre elas, para o mesmo material e para a mesma solução. Contudo, observam-se por vezes, desvios muito significativos entre provetes da mesma família. É de fácil perceção que há uma relação entre essas curvas de secagem e o índice de secagem, por um lado, e a degradação que os diferentes provetes da família apresentam, por outro.

Para a argamassa, o único caso em que as curvas de secagem não têm o mesmo andamento é no caso do carbonato de sódio, em que o provete A7.3 não acompanha os outros dois provetes, apresentando uma secagem mais lenta (figura 3.48) que se reflete num índice de secagem superior ao dos outros dois provetes (Tabela 3.19). Consegue-se relacionar este facto com o estado físico do provete, verifica-se que o provete que seca mais devagar é o provete A7.3 que é o que em melhor estado está. Já os provetes A7.1 e A7.2 ficam completamente desintegrados.

Nesta linha de raciocínio, pode-se atribuir o facto de os provetes de argamassa imersos em sulfato de sódio terem secado tão mais depressa do que os dos outros sais (figuras 3.35, 3.36, 3.51 e 3.52) ao facto, não só de a humidade relativa de equilíbrio do sulfato de sódio ser muito próxima da da água como também por estarem completamente desintegrados, o que facilita a evaporação da água do interior do provete.

Para os provetes de tijolo ensaiados com cloreto de potássio, verifica-se uma dispersão considerável entre as três curvas de secagem, sendo também possível observar manifestações físicas diferentes nos três provetes. O provete que seca mais depressa é o T4.1 e é também o que manifesta as maiores eflorescências, com bastante volume, mostrando-se a crosta cristalina empolada. Já o provete T4.2 é o que apresenta menor degradação, correspondendo-lhe a secagem mais lenta (figuras 3.38 e 3.39 e Tabela 3.19).

Quanto aos provetes de tijolo imersos em nitrato de sódio, o provete T5.3 seca mais rápido e verifica-se novamente que é o mais degradado, com uma espessa crosta de sal que cobre toda a sua face superior (figuras 3.41 e 3.43). Estas diferenças refletem-se numa grande dispersão de valores no índice de secagem (figura 3.51).

Brito e Gonçalves num artigo recente [29] também observaram uma componente de imprevisibilidade na degradação sofrida por provetes do mesmo material, sujeitos às mesmas condições experimentais, diferenças essas por vezes com impacto relevante no comportamento à secagem. As autoras consideraram que essas variações se podem dever à natural heterogeneidade dos materiais, flutuações nas condições ambientes, etc.

3.6. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste subcapítulo resumem-se os resultados experimentais dos ensaios de capilaridade e de secagem. As principais conclusões do ensaio de capilaridade são:

- Os sais solúveis influenciam a absorção por capilaridade;
- Os provetes de argamassa apresentam no geral um coeficiente de capilaridade superior ao do tijolo;
- Os sais que contêm o ião sódio conduzem a coeficientes de capilaridade inferiores ao da água e os que contêm o ião potássio conduzem a coeficientes de capilaridade superiores aos da água;
- A correlação linear da sorvidade em função de $(\sigma/\eta)^{1/2}$ foi melhor para o tijolo do que para a argamassa, isto pode dever-se a uma maior heterogeneidade dos materiais estudados e a lapsos ocorridos durante o ensaio.

Tabela 3.20 – Valores resumo do coeficiente de capilaridade médio dos provetes de argamassa e tijolo.

C (kg.m⁻².s^{-1/2})	Provetes Tijolo	Provetes Argamassa
Água	0,1448	0,1642
NaCl	0,1022	0,1350
Na₂SO₄	0,1159	0,1617
KCl	0,1673	0,1868
NaNO₃	0,0926	0,1405
KNO₃	0,1665	0,1772
Na₂CO₃	0,0967	0,1469

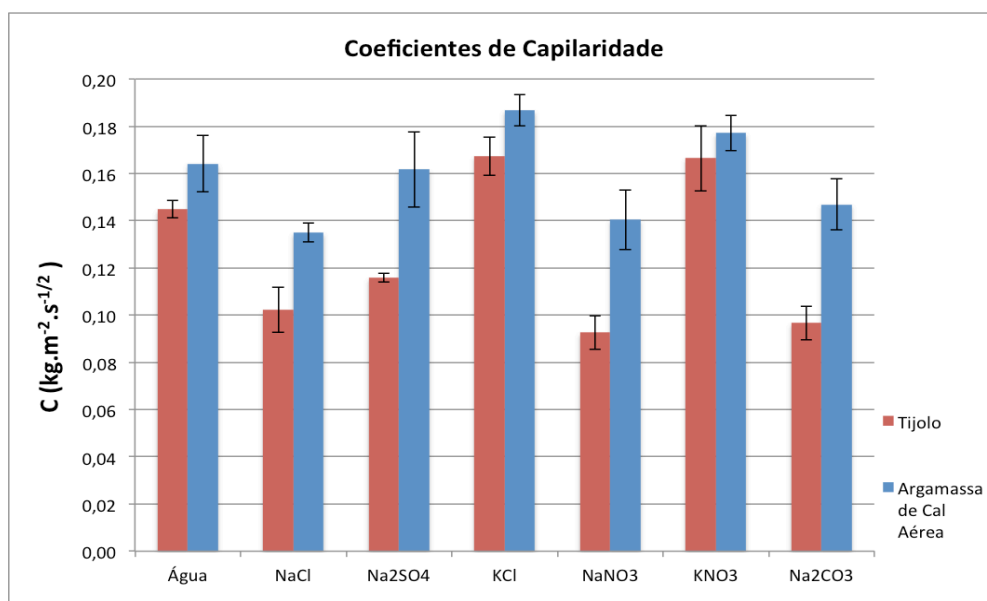


Figura 3.57 – Coeficiente de Capilaridade médio e respetivo desvio padrão, do tijolo e da argamassa para cada solução salina.

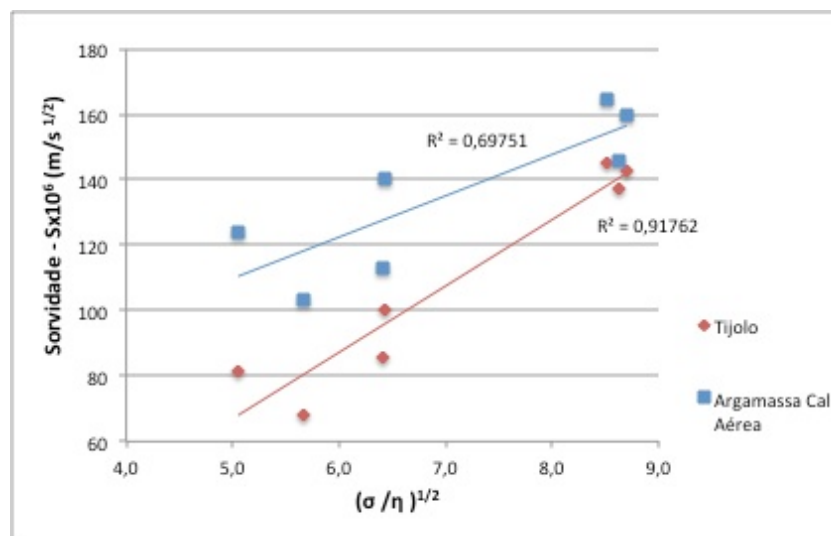


Figura 3.58 – Sorvidade representada em função de $(\sigma/\eta)^{1/2}$ para o tijolo e a argamassa de cal aérea.

As principais conclusões que se podem tirar do ensaio de secagem são:

- Os provetes mais rápidos a secar são os da água, seguindo-se os do sulfato de sódio; os restantes ainda não estão secos, após mais de dois meses de ensaio.
- Os provetes da mesma família apresentam, por vezes, tipos diferentes de degradação.
- Conseguem-se relacionar as curvas de secagem com as alterações físicas dos provetes, quanto mais alterado está o provete menor é o teor de água, o que se traduz numa maior taxa de secagem.

Tabela 3.21 – Valores resumo do índice de secagem médio dos provetes de argamassa e tijolo.

I.S.	Provetes Tijolo	Provetes Argamassa
Água	0,1877	0,1424
NaCl	0,8140	0,8382
Na ₂ SO ₄	0,4721	0,3149
KCl	0,8387	0,8586
NaNO ₃	0,8679	0,9178
KNO ₃	0,7834	0,8229
Na ₂ CO ₃	0,8620	0,3823

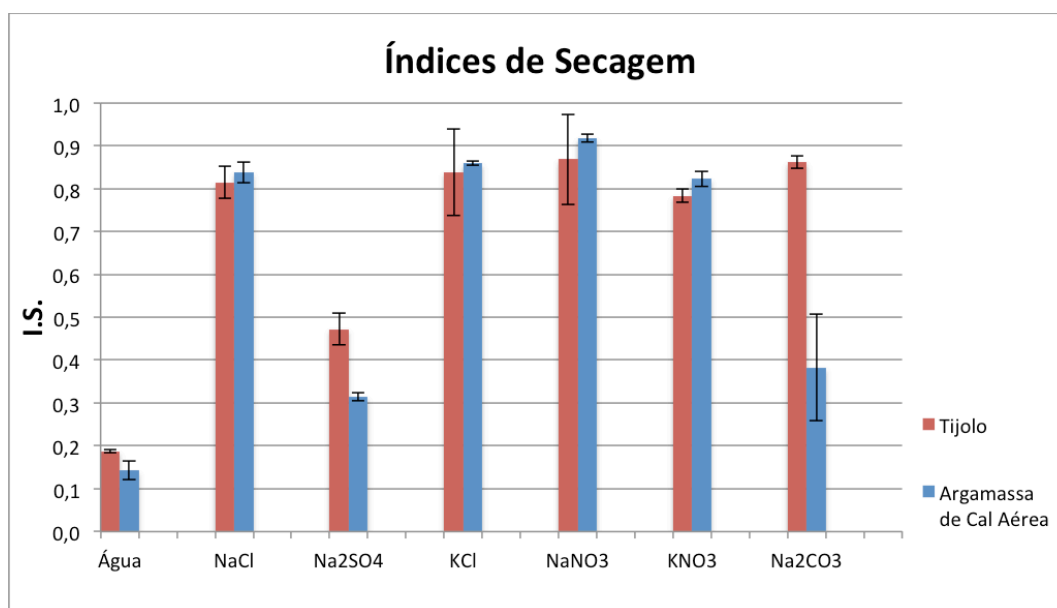


Figura 3.59 – Índice de secagem médio e respetivo desvio padrão, do tijolo e da argamassa para cada solução salina.

4 CONCLUSÃO

4.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao finalizar esta dissertação é possível afirmar que o objetivo inicialmente proposto foi cumprido, uma vez que se avançou na compreensão da influência dos sais solúveis na absorção capilar e na secagem de materiais porosos.

Foi um trabalho complexo e intenso, com forte componente laboratorial, envolvendo várias dezenas de provetes de dois tipos de materiais de construção porosos e seis soluções aquosas salinas. Realizaram-se dois tipos de ensaios durante três meses, tendo-se gasto cerca de um mês nos ensaios de capilaridade e dois meses na monitorização da secagem.

O estudo permitiu perceber de que forma diferentes tipos de sais dissolvidos em água influenciam o coeficiente de absorção capilar, bem como analisar a secagem subsequente à absorção capilar, observando a degradação dos provetes e relacionando-a com o tipo de sal. Pôde concluir-se o seguinte:

- Todos os sais influenciam o coeficiente de absorção capilar dos dois materiais de construção porosos estudados;
- Os provetes de argamassa, no geral, apresentam um coeficiente de absorção capilar superior aos provetes de tijolo;
- Os sais que contêm o ião sódio levam a coeficientes de absorção capilar inferiores aos obtidos com água pura, enquanto os sais constituídos pelo ião potássio levam a coeficientes de capilaridade superiores;
- A correlação linear entre a sorvidade do tijolo para todos os sais, quando em função de $(\sigma/\eta)^{1/2}$, mostrou-se melhor do que para a argamassa, embora esta correlação para a argamassa seja mais fraca também apresenta uma tendência linear, claramente.
- Esta relação linear entre a sorvidade e $(\sigma/\eta)^{1/2}$ indica que o efeito dos sais no transporte capilar se deve à influência do sal na viscosidade e tensão superficial do líquido;
- Os provetes imersos em água secaram mais depressa;
- Os provetes contaminados com sais secaram mais lentamente. Os provetes contaminados com sulfato de sódio foram os mais rápidos a secar de entre os seis sais, tendo os provetes de tijolo concluído a secagem em cerca de dois meses e os provetes de argamassa em um mês. Os restantes continuam em processo de secagem;
- O comportamento na secagem dos provetes de argamassa ou tijolo nem sempre foi igual para a mesma solução, tal como a sua degradação. É possível relacionar as

curvas de secagem com a degradação dos provetes, quanto mais alterado está o provete, maior a sua taxa de secagem.

- O sal mais agressivo, em termos de deterioração, para os dois materiais, foi o sulfato de sódio;
- Os provetes que se sofreram maior degradação foram os de argamassa de cal aérea.

Em suma, os resultados obtidos da realização deste trabalho mostram que realmente existe influência dos sais na absorção capilar, que não depende só do tipo de sal mas também do material poroso. A presença de sais no interior dos materiais porosos também afeta a cinética de secagem, tornando-a mais lenta na generalidade dos casos. A degradação mostrou-se mais agressiva para os provetes de argamassa, e para o sulfato de sódio. Nem todos os provetes da mesma família, ou seja, do mesmo material e sujeitos às mesmas condições experimentais, se degradaram da mesma forma.

4.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Na sequência deste trabalho, outros projetos de investigação poderão ser realizados no âmbito da degradação por sais solúveis em materiais porosos, quer seja no domínio da capilaridade ou da secagem. Apresentam-se seguidamente as propostas para o seu desenvolvimento:

- Monitorização do processo secagem dos provetes utilizados neste trabalho, para que se possa calcular o índice de secagem de forma mais adequada, com o tempo de secagem correspondente ao sal que demorar mais a secar, entre os dois materiais, bem como avaliar a degradação final dos provetes;
- Efetuar ciclos cristalização/dissolução de sais e avaliar a forma como estes ciclos influenciam o coeficiente de capilaridade, o índice de secagem a tipologia de degradação, uma vez que estes ciclos ocorrem em obra e é importante perceber, mediante ensaios em condições controladas, o seu efeito para diferentes materiais e sais solúveis;
- Analisar neste mesmo âmbito, outros materiais e outros sais, procurando-se aumentar o número de provetes para cada situação;
- Investigar melhor a influência dos sais na absorção capilar na argamassa de cal. As argamassas de cal são um tipo de material extremamente relevante nas construções históricas e têm características microestruturais muito próprias, em relação aos restantes materiais correntes nestas construções, decorrentes de serem materiais artificiais compostos por areia numa matriz de ligante. É importante por isso perceber de que forma o transporte líquido na sua estrutura porosa é afetado pela presença de sais. A correlação linear da sorvidade com $(\sigma/\eta)^{1/2}$ foi significativamente mais fraca para a argamassa do que para os restantes materiais (tijolo cerâmico e pedras naturais) estudados nesta dissertação e em trabalhos anteriores. Esse facto levanta dúvidas em relação aos pressupostos teóricos de estas argamassas serem materiais inertes, que são completamente molhados pelo líquido e que não sofrem alterações microestruturais durante a absorção;
- Avaliar as razões de a secagem (dos dois materiais) ser mais lenta em presença de sais. A mais lenta sucção capilar não é certamente a causa para os sais com o ião K^+ , uma vez que o coeficiente de capilaridade é mais alto que o da água pura e a sorvidade é equivalente. É pois importante considerar a possibilidade de as crostas salinas estarem a bloquear o trasposte de vapor e avaliar em que casos e grau isso

acontece. Para tal vai ser necessário determinar a permeabilidade ao vapor dos provetes no fim da secagem, bem como definir o método experimental mais adequado para o fazer uma vez que vários dos provetes estarão em estado bastante frágil.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. Appleton, *Reabilitação de Edifícios Antigos*. Portugal: Edições ORION, 2003.
- [2] A. E. Charola, "Salts in the deterioration of porous materials: An overview," *Journal of the American Institute for Conservation*, vol. 39, pp. 327-343, 2000.
- [3] T. Gonçalves, "Salt crystallization in plastered or rendered walls," Tese de Doutoramento, LNEC e IST, Lisboa, 2007.
- [4] T. Gonçalves and J. D. Rodrigues, "Argamassas de Revestimento para paredes afectadas por cristalização de sais solúveis: influência do substrato," presented at the 3º Congresso Português de Argamassas de Construção, Lisboa, LNEC, 2010.
- [5] "International charter for the conservation and restoration of monuments and sites," presented at the International Congress of Architects and Technicians of Historical Monuments, Venice, 1964.
- [6] T. D. Gonçalves and J. D. Rodrigues, "Rebocos para paredes antigas afectadas por sais solúveis: patologia, princípios de funcionamento e adequabilidade," presented at the Sais solúveis em argamassas de edificios antigos: danos, processos e soluções . LNEC, 2005.
- [7] A. Urland and E. Borrelli, *ARC Laboratory Handbook*. Rome: ICCROM, 1998.
- [8] E. Borrelli, "Salts in porous building materials: caracterization, forms of deterioration, surveying, sampling and measuring.," *Sais solúveis em argamassas de edificios antigos: danos, processos e soluções . LNEC*, 2006.
- [9] C. d. Wikipedia. (2013, 31 maio 2013). *Cristalização*. Available: <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Cristaliza%C3%A7%C3%A3o&oldid=35860712>
- [10] K. Linnow, A. Zeunert, and M. Steiger, "Investigation of sodium sulfate phase transitions in a porous material using humidity- and temperature-controlled x-ray diffraction," *Analytical Chemistry*, vol. 78, pp. 4683-4689, // 2006.
- [11] R. Chang, *Química*, 8ª edição ed., 2005.
- [12] Infopedia. (2003-2013, 1/06). *Densidade - física*. Available: <URL: [http://www.infopedia.pt/\\$tensao-superficial%3E](http://www.infopedia.pt/$tensao-superficial%3E).
- [13] Infopedia. (2003-2013, 1/06). *Viscosidade*. Available: <URL: [http://www.infopedia.pt/\\$tensao-superficial%3E](http://www.infopedia.pt/$tensao-superficial%3E).
- [14] Infopedia. (2003-2013, 1/06). *tensão superficial*. Available: <URL: [http://www.infopedia.pt/\\$tensao-superficial%3E](http://www.infopedia.pt/$tensao-superficial%3E).
- [15] V. Freitas, M. Torres, and A. Guimarães, *Humidade Ascensional*: FEUP edições, 2008.
- [16] P. Puim, "Controlo e reparação de anomalias devidas à presença de sais solúveis em edificios antigos," Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2010.
- [17] A. S. Guimarães, "Caracterização experimental do funcionamento de sistemas de ventilação da base das paredes para tratamento da humidade ascensional," Tese de Mestrado, FEUP, Porto, 2007.

- [18] M. Lipcsey, "Installation for drying and damp-proofing hydrophilic structural portions of buildings, particular brickwork.," Hungarian Information Centre of Building, Budapest.
- [19] C. Hall and W. Hoff, *Water Transport in Brick, Stone and Concrete*. London and New York, 2002.
- [20] A. Cardeira, "Análise Macroscópica do efeito de dois modificadores de cristalização com baixa toxicidade," Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, 2010.
- [21] V. Brito, "Influência dos revestimentos por pintura na secagem do suporte," Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Lisboa, 2009.
- [22] "RILEM TC 25-PEM Recommendend tests to measure the deterioration of stone ans to assess the effectiveness of treatment methods," *Materials and Structures*, vol. 13, pp. 204-209, 1980.
- [23] T. D. Gonçalves, L. Pel, and J. D. Rodrigues, "Influence of paints on drying and salt distribution processes in porous building materials," *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 1751-1759, 5// 2009.
- [24] R. J. Gummerson, C. Hall, and W. D. Hoff, "Water movement in porous building materials-II. Hydraulic suction and sorptivity of brick and other masonry materials," *Building and Environment*, vol. 15, pp. 101-108, // 1980.
- [25] V. Beltran, A. Escardino, C. Feliu, and M. D. Rodrigo, "LIQUID SUCTION BY POROUS CERAMIC MATERIALS," *British ceramic. Transactions and journal*, vol. 87, pp. 64-69, // 1988.
- [26] E. Ruiz-Agudo, F. Mees, P. Jacobs, and C. Rodriguez-Navarro, "The role of saline solution properties on porous limestone salt weathering by magnesium and sodium sulfates," *Environmental Geology*, vol. 52, pp. 305-317, // 2007.
- [27] P. Rucker, A. Holm, and M. Krus, "Determination of moisture and salt content distributors by combining NMR and gamma ray measurements.," presented at the Materialsweek, Munich, 2000.
- [28] R. M. Espinosa Marzal and G. W. Scherer, *Proceedings of the 11th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, vol. 1, pp. 81-88, 2008.
- [29] V. Brito and T. D. Gonçalves, "Effects of NaCl and NaNO₃ on the capillary suction, drying kinetics and vapour permeability of three building stones.," presented at the Workshop CRYSPOM III - Crystallization in porous media, Troia, Portugal, 2012.
- [30] A. S. Begonha, *Meteorização do granito e deterioração da pedra em monumentos e edificios da cidade do Porto*. Porto: FEUP edições, 2001.
- [31] S. Couto, "Utilização de hidrófugos de superfície em materiais cerâmicos. Influência na secagem.," Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2010.
- [32] T. D. Gonçalves, V. Brito, and L. Pel, "Water Vapor Emission From Rigid Mesoporous Materials during the Constant Drying Rate Period, Drying Technology," *An International Journal*, vol. 30:5, pp. 462-474, 2012.
- [33] T. D. Gonçalves, V. Brito, and L. Pel, "Water Vapor Emission From Rigid Mesoporous Materials during the Constant Drying Rate Period," *Drying Technology*, vol. 30, pp. 462-474, 2012/04/01 2012.

- [34] W. Contributors. (2013, 23 Março 2013). *Solubility Table*. Available: http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Solubility_table&oldid=555522495
- [35] D. R. Lide, Ed., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Boca Raton: CRC Press, 1995-1996, p.^pp. Pages.
- [36] (1954 ; 2003, 29 Abril 2013). *Smithsonian Physical Tables (9th Revised Edition ed.)*.
- [37] F. M. d. Mello, "A infiltração em condições de submersão. Uma aproximação numérica ao método de Philip.," *Recursos Hídricos*, vol. 5, pp. 79-94, 1984.
- [38] C. Normal, "Misura dell'indice di asciugamento (drying index)," vol. Doc n° 29/88, ed. Roma: CNR/ICR, 1991.

ANEXO 1

Exemplo da folha cálculo do coeficiente de capilaridade, provete de tijolo com água:

Tijolo					
T1.1					
tempo (min)	tempo (s)	\sqrt{t} (s)	m k(g)	ΔM (kg)	$\Delta M/A$ (kg/m ²)
0	0	0	0,288483	0	0
1	60	7,745966692	0,291404	0,002921	1,1684
3	180	13,41640786	0,29344	0,004957	1,9828
5	300	17,32050808	0,294918	0,006435	2,574
10	600	24,49489743	0,29746	0,008977	3,5908
15	900	30	0,299671	0,011188	4,4752
30	1800	42,42640687	0,304518	0,016035	6,414
60	3600	60	0,311108	0,022625	9,05
480	28800	169,7056275	0,311726	0,023243	9,2972
1440	86400	293,9387691	0,312055	0,023572	9,4288
A (m ²)					0,0025
C (kg.m ⁻² .s ^{-1/2})					0,1474

Exemplo da folha de cálculo do coeficiente de capilaridade, provete de argamassa com água:

Argamassa					
A1.1					
tempo (min)	tempo (s)	\sqrt{t} (s)	m (kg)	ΔM (kg)	$\Delta M/A$ (kg/m ²)
0	0	0	0,220236	0	0
2	120	10,95445115	0,222828	0,002592	1,0368
5	300	17,32050808	0,226274	0,006038	2,4152
10	600	24,49489743	0,229778	0,009542	3,8168
15	900	30	0,232176	0,01194	4,776
30	1800	42,42640687	0,236845	0,016609	6,6436
45	2700	51,96152423	0,239835	0,019599	7,8396
60	3600	60	0,241438	0,021202	8,4808
180	10800	103,9230485	0,242518	0,022282	8,9128
240	14400	120	0,242573	0,022337	8,9348
360	21600	146,9693846	0,24267	0,022434	8,9736
420	25200	158,7450787	0,242712	0,022476	8,9904
1440	86400	293,9387691	0,242991	0,022755	9,102
A(m ²)					0,0025
C (kg.m ⁻² .s ^{-1/2})					0,1775

Exemplo da folha de cálculo do coeficiente de capilaridade, provete de tijolo com solução salina cloreto de sódio:

Tijolo					
T2.1					
tempo (min)	tempo (s)	vt (s)	m (kg)	ΔM (kg)	$\Delta M/A$ (kg/m ²)
0	0	0	0,289228	0	0
1	60	7,745966692	0,291661	0,002433	0,9732
3	180	13,41640786	0,293128	0,0039	1,56
5	300	17,32050808	0,294165	0,004937	1,9748
10	600	24,49489743	0,296096	0,006868	2,7472
15	900	30	0,2976	0,008372	3,3488
30	1800	42,42640687	0,301024	0,011796	4,7184
60	3600	60	0,306149	0,016921	6,7684
90	5400	73,48469228	0,309776	0,020548	8,2192
120	7200	84,85281374	0,313	0,023772	9,5088
150	9000	94,86832981	0,314594	0,025366	10,1464
180	10800	103,9230485	0,314803	0,025575	10,23
210	12600	112,2497216	0,314951	0,025723	10,2892
480	28800	169,7056275	0,31492	0,025692	10,2768
1440	86400	293,9387691	0,314904	0,025676	10,2704
				A (m ²)	0,0025
				C (kg.m ⁻² .s ^{-1/2})	0,1069

Exemplo da folha de cálculo da curva de absorção por capilaridade, provete de argamassa com solução salina cloreto de sódio:

argamassa					
A2.1					
tempo (min)	tempo (s)	vt (s)	m (g)	ΔM (kg)	$\Delta M/A$ (kg/m ²)
0	0	0	0,219541	0	0
2	120	10,95445115	0,220864	0,001323	0,5292
5	300	17,32050808	0,222674	0,003133	1,2532
10	600	24,49489743	0,224859	0,005318	2,1272
15	900	30	0,226839	0,007298	2,9192
30	1800	42,42640687	0,231442	0,011901	4,7604
45	2700	51,96152423	0,234129	0,014588	5,8352
60	3600	60	0,236815	0,017274	6,9096
75	4500	67,08203932	0,238792	0,019251	7,7004
90	5400	73,48469228	0,240748	0,021207	8,4828
105	6300	79,37253933	0,242272	0,022731	9,0924
120	7200	84,85281374	0,243504	0,023963	9,5852
135	8100	90	0,244497	0,024956	9,9824
150	9000	94,86832981	0,244912	0,025371	10,1484
165	9900	99,49874371	0,245358	0,025817	10,3268
180	10800	103,9230485	0,245514	0,025973	10,3892
240	14400	120	0,245773	0,026232	10,4928
360	21600	146,9693846	0,245758	0,026217	10,4868
420	25200	158,7450787	0,246057	0,026516	10,6064
1440	86400	293,9387691	0,246132	0,026591	10,6364
				A (m ²)	0,0025
				C (kg.m ⁻² .s ^{-1/2})	0,1349

Exemplo da folha de cálculo da curva de secagem, provete de tijolo com água:

(Obtém-se da mesma forma para provetes de tijolo e argamassa, estando ou não na presença de sais)

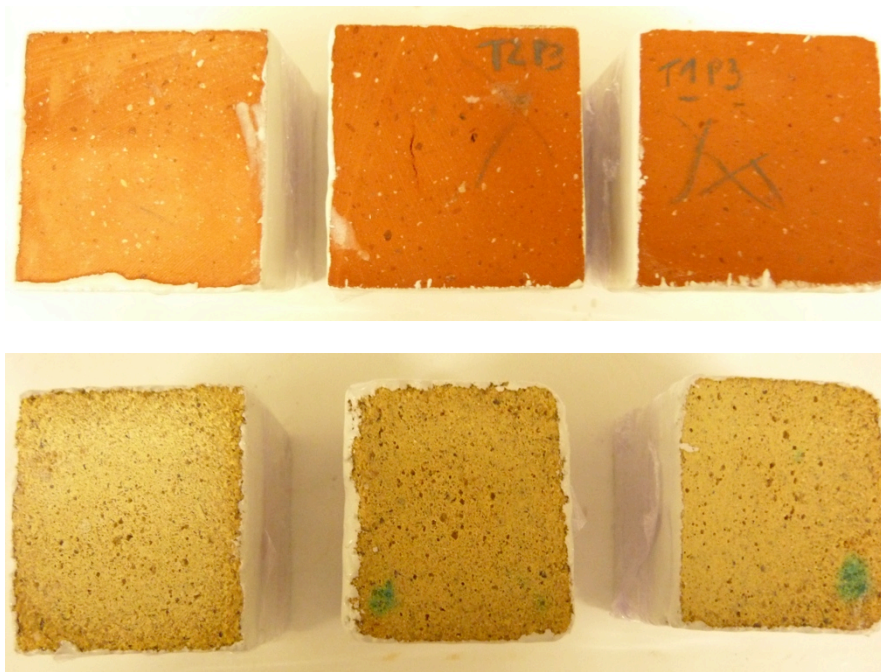
Tijolo			
T1.1			
t (h)	m (g)	mi (g)	wi (%)
0	312,667	305,953	8,3476
1	312,395	305,681	8,2513
2	312,131	305,417	8,1578
3	311,841	305,127	8,0551
4	311,648	304,934	7,9867
5	311,439	304,725	7,9127
6	311,153	304,439	7,8114
7	310,938	304,224	7,7353
8	310,603	303,889	7,6167
24	307,128	300,414	6,3861
27	306,355	299,641	6,1123
30	305,585	298,871	5,8396
120	297,293	290,579	2,9032
144	296,482	289,768	2,6160
168	295,879	289,165	2,4024
192	295,51	288,796	2,2718
264	293,729	287,015	1,6410
288	293,425	286,711	1,5334
312	293,133	286,419	1,4300
336	292,815	286,101	1,3174
360	292,02	285,306	1,0358
384	291,816	285,102	0,9636
408	291,618	284,904	0,8935
432	291,469	284,755	0,8407
456	291,231	284,517	0,7564
528	290,728	284,014	0,5783
552	290,564	283,85	0,5202
576	290,382	283,668	0,4558
600	290,224	283,51	0,3998
624	289,998	283,284	0,3198
696	289,495	282,781	0,1417
864	289,444	282,73	0,1236
1032	289,368	282,654	0,0967
1200	289,363	282,649	0,0949
1368	289,377	282,663	0,0999

mi= massa do provete excluindo o peso do impermeabilizante e da folha de polietileno.

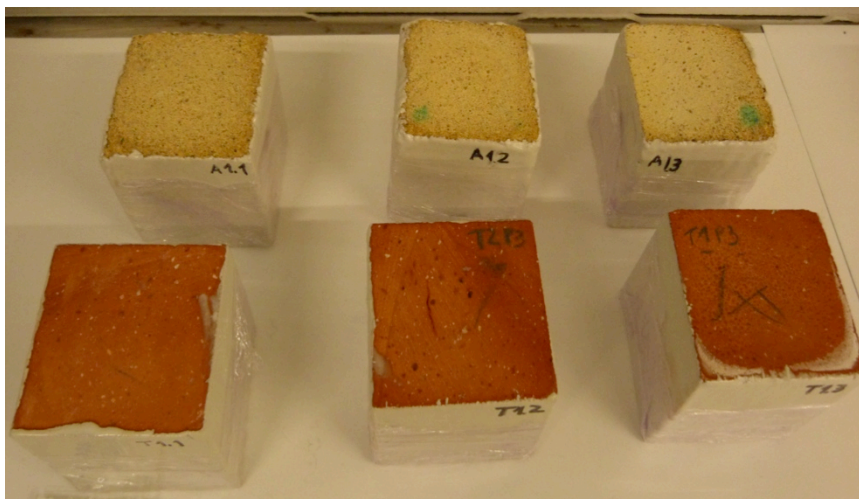
ANEXO 2

Evolução da deterioração dos provetes de tijolo e argamassa durante a secagem.

- Água
2º dia de secagem:



2ª semana de secagem (os provetes mantiveram-se assim até ao término desta dissertação):



- Cloreto de Sódio
2º dia de secagem:



2ª semana de secagem:

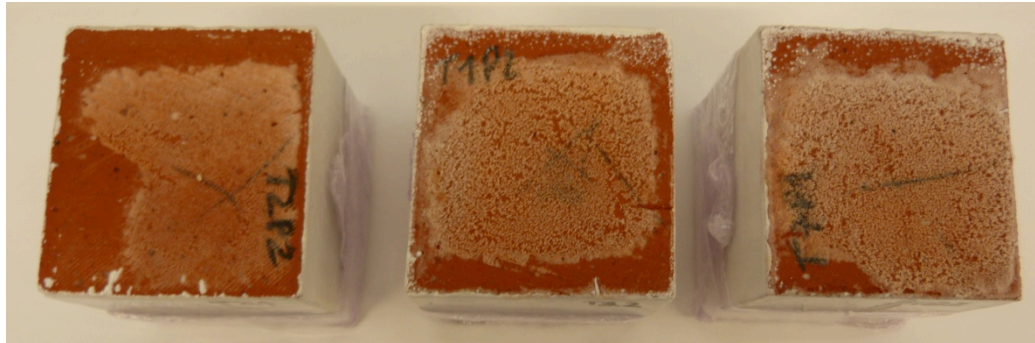


3ª semana de secagem (os provetes mantiveram-se assim até ao término desta dissertação):



- Sulfato de Sódio

1º dia de secagem:



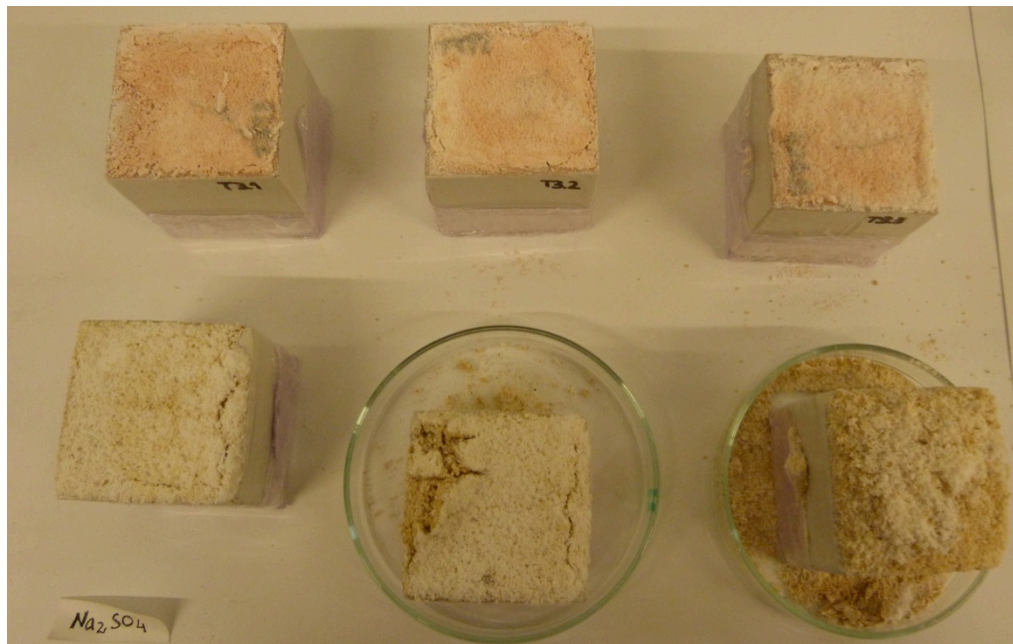
2º dia de secagem:



3º dia de secagem:

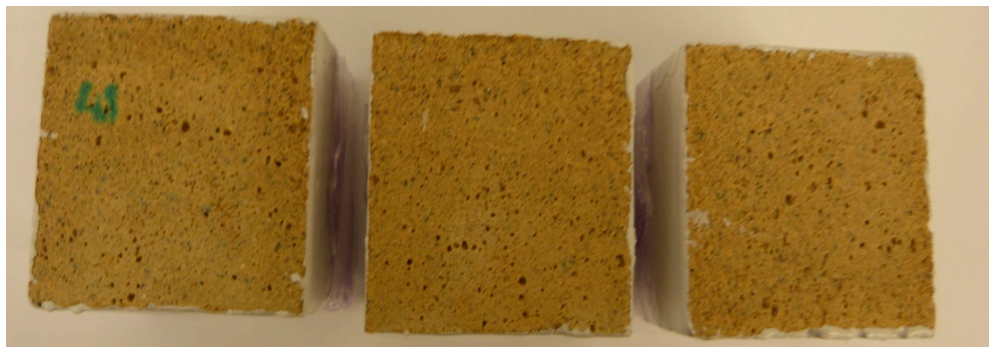
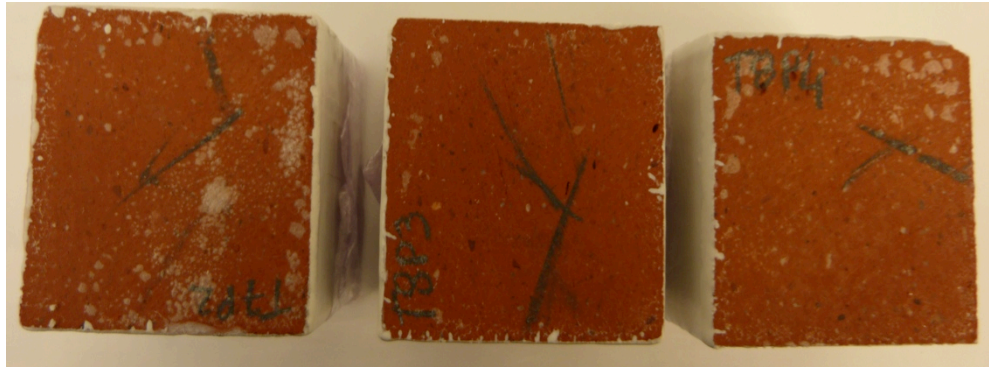


2ª semana de secagem (os provetes mantiveram-se com este aspeto até ao término desta dissertação):

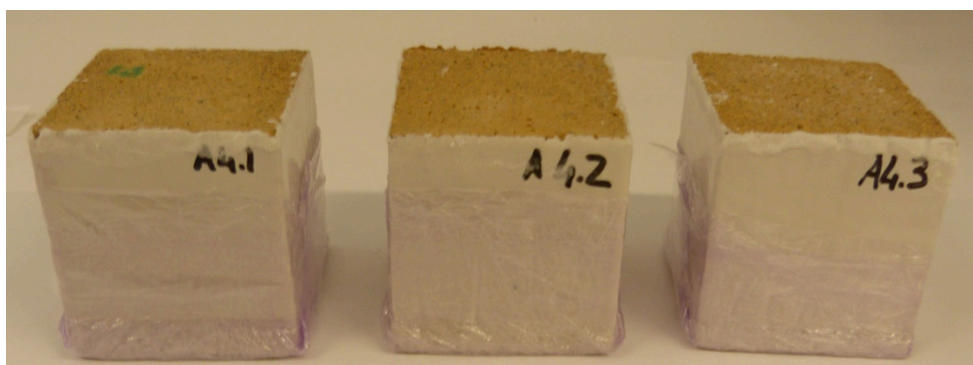
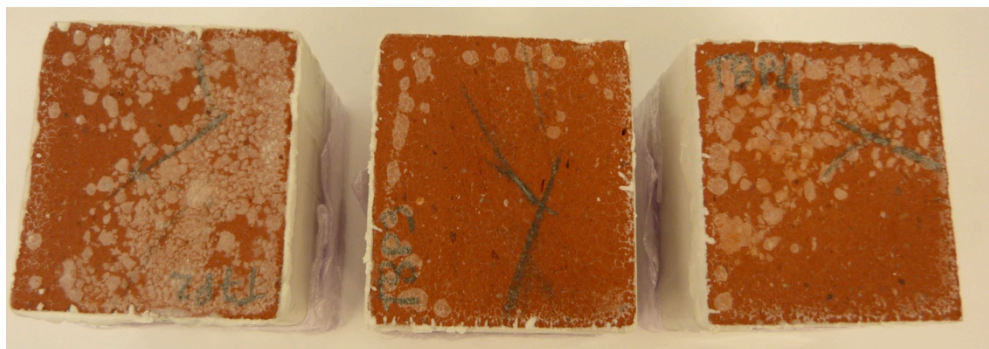


- Cloreto de Potássio:

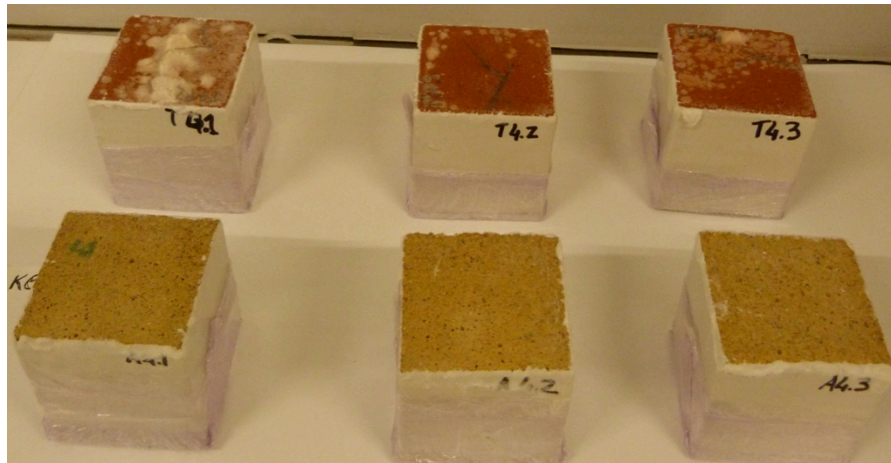
1º dia de secagem:



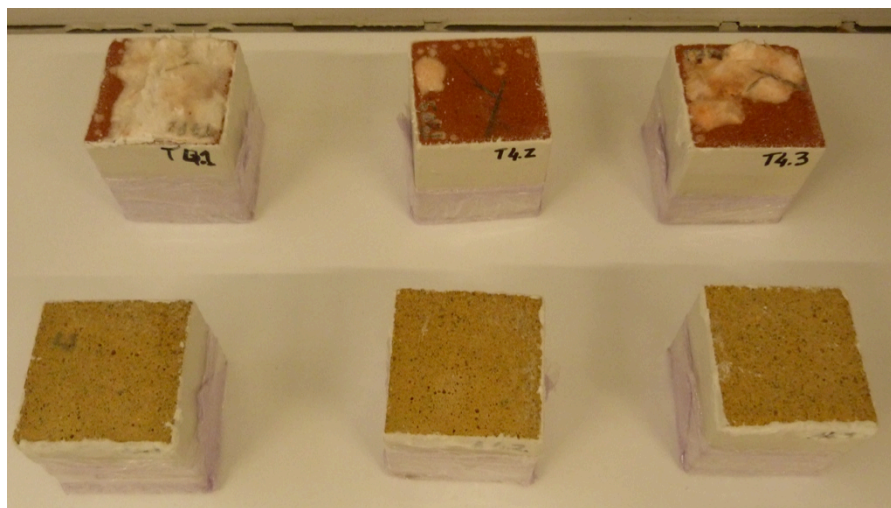
2º dia de secagem:



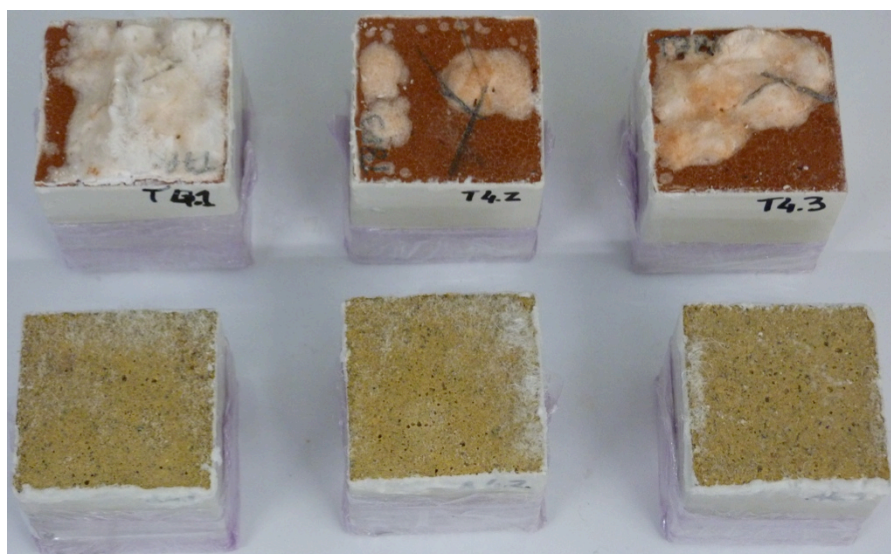
2ª semana de secagem:



3ª semana de secagem:

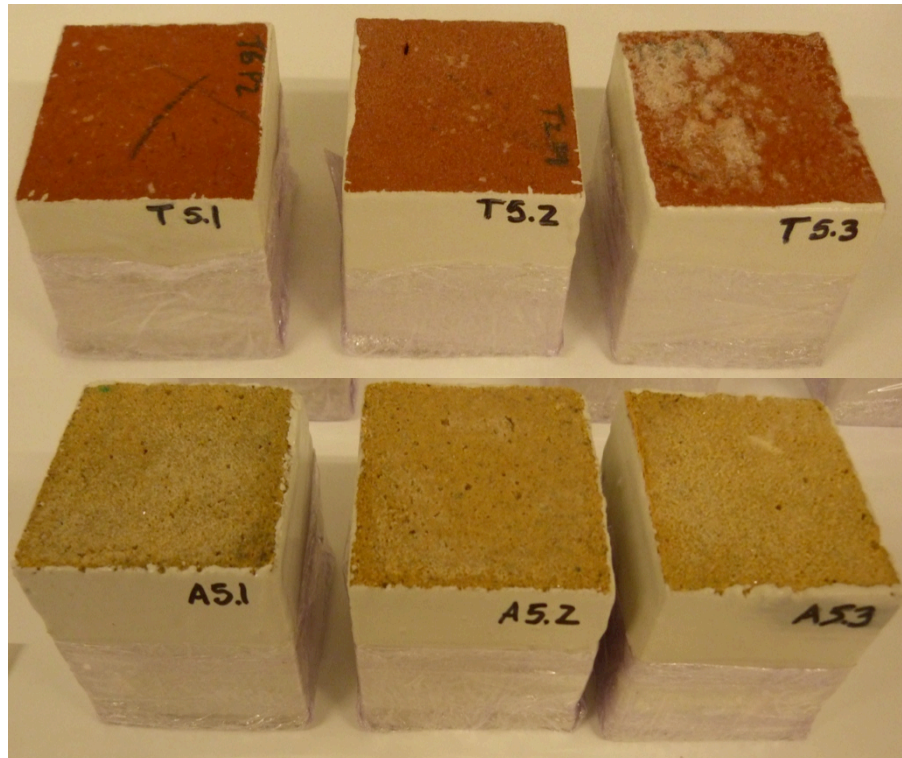


6ª semana de secagem (os provetes mantiveram-se com este aspeto até ao término desta dissertação):

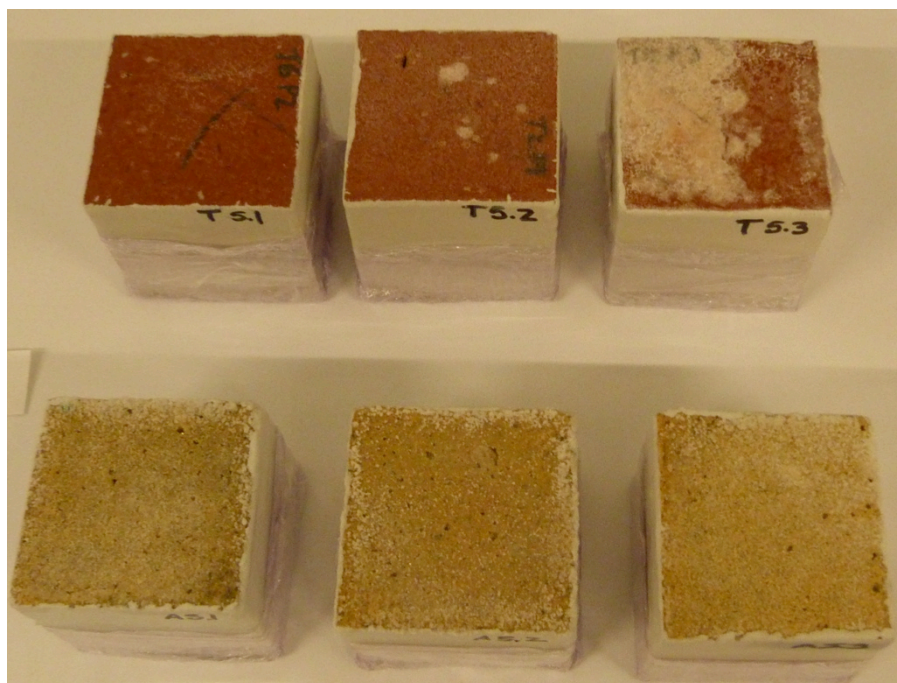


- Nitrato de Sódio

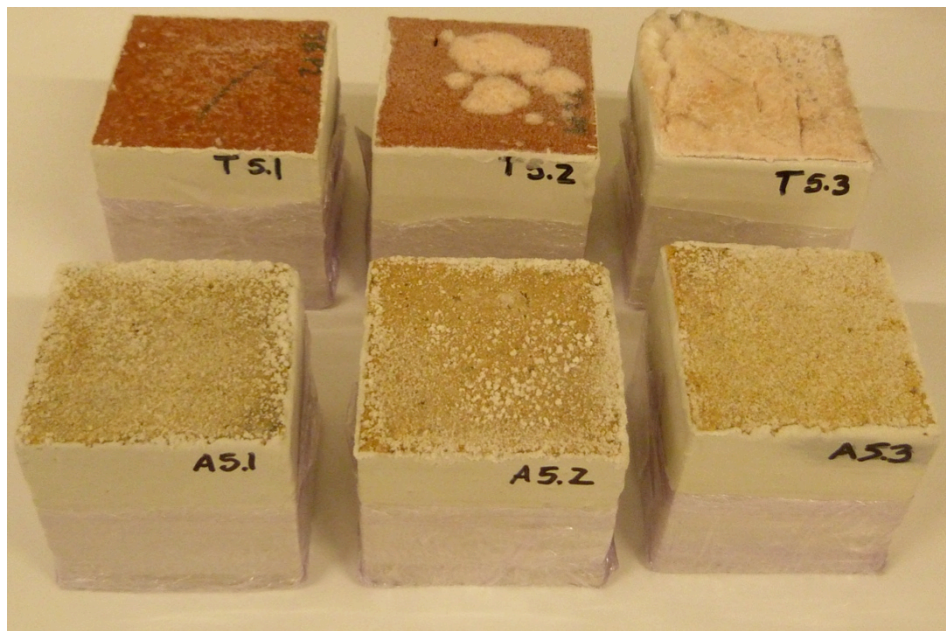
1º dia de secagem:



2º dia de secagem:



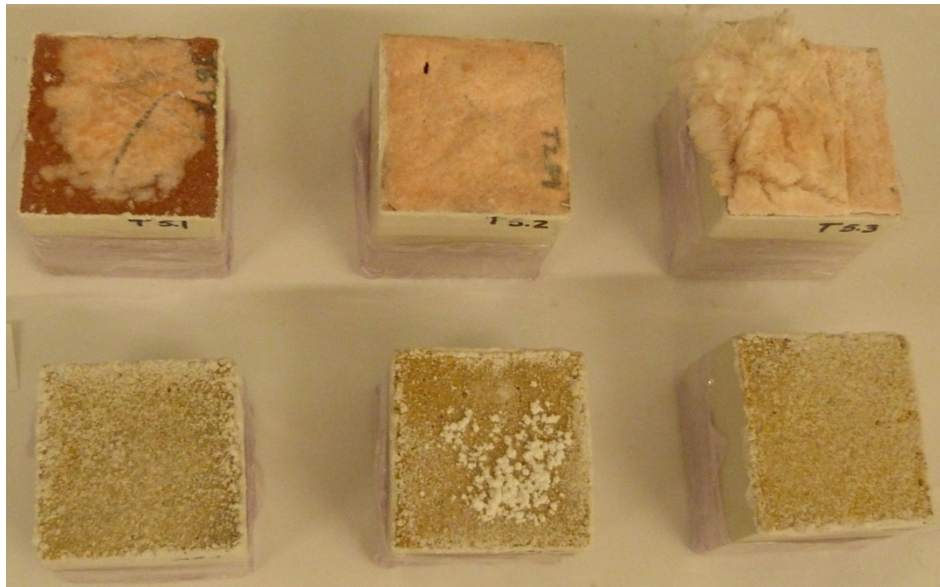
3º dia de secagem:



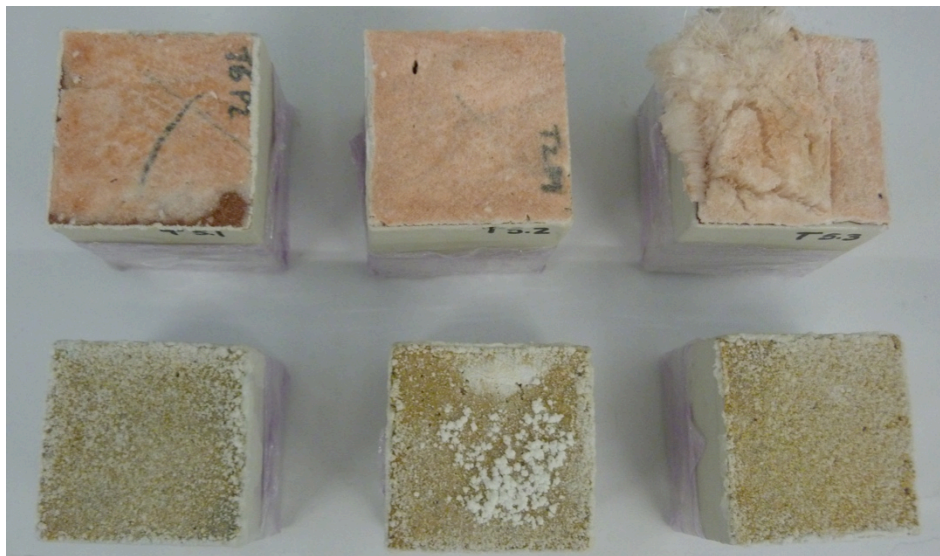
2ª semana de secagem:



3ª semana de secagem:

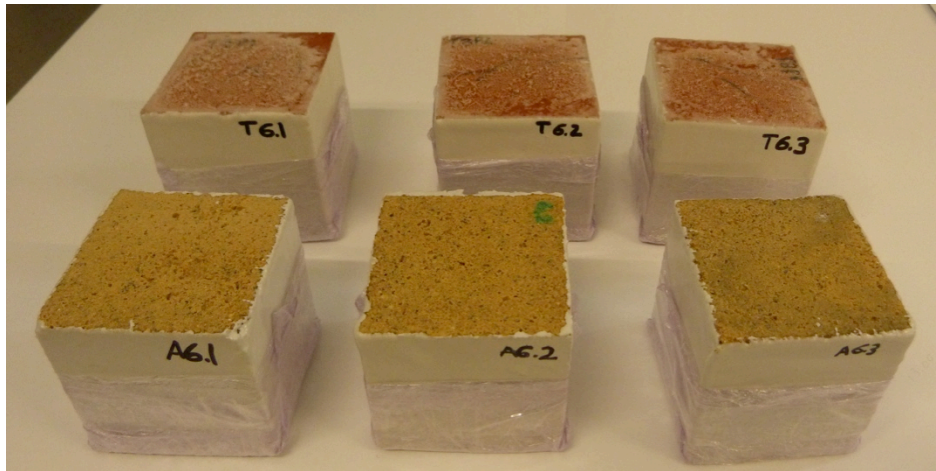


6ª semana de secagem (os provetes mantiveram-se com este aspeto até ao término desta dissertação):

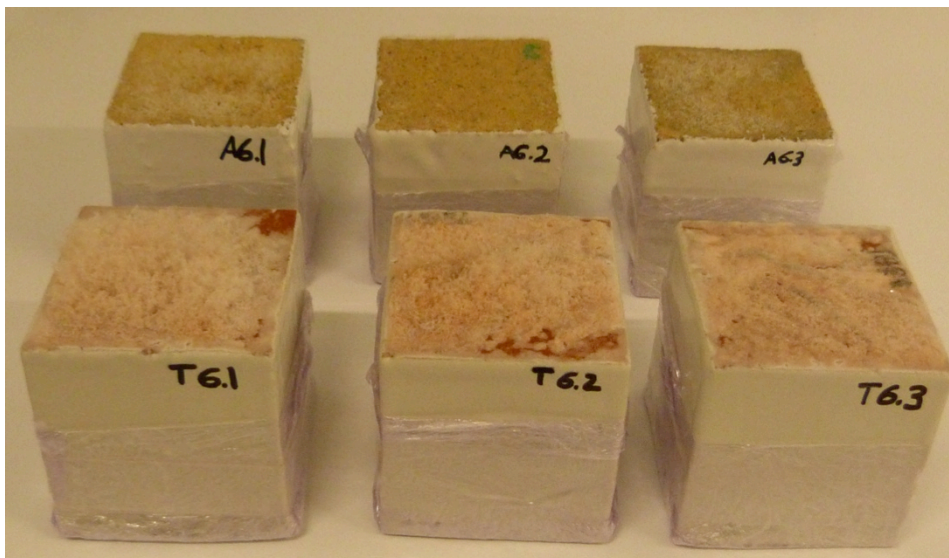


- Nitrato de Potássio

1º dia de secagem:



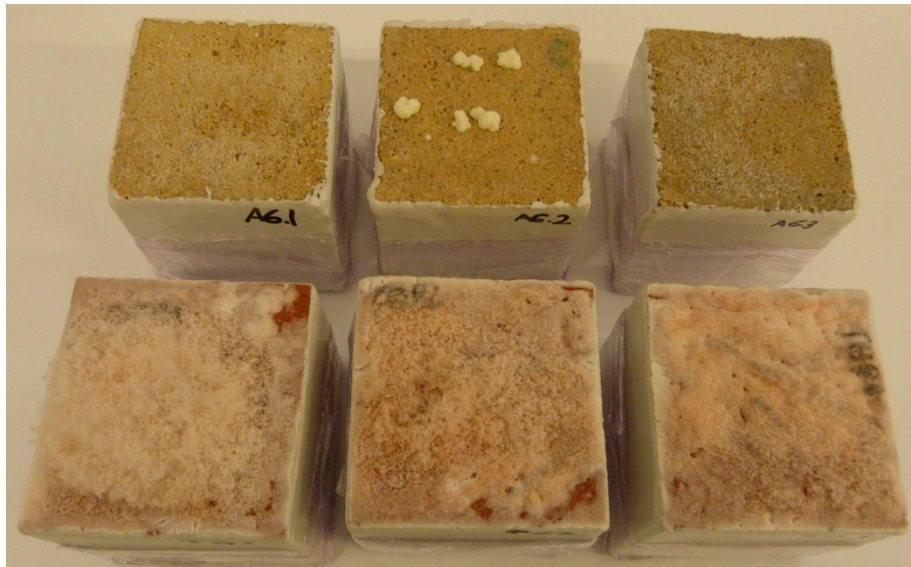
2º dia de secagem:



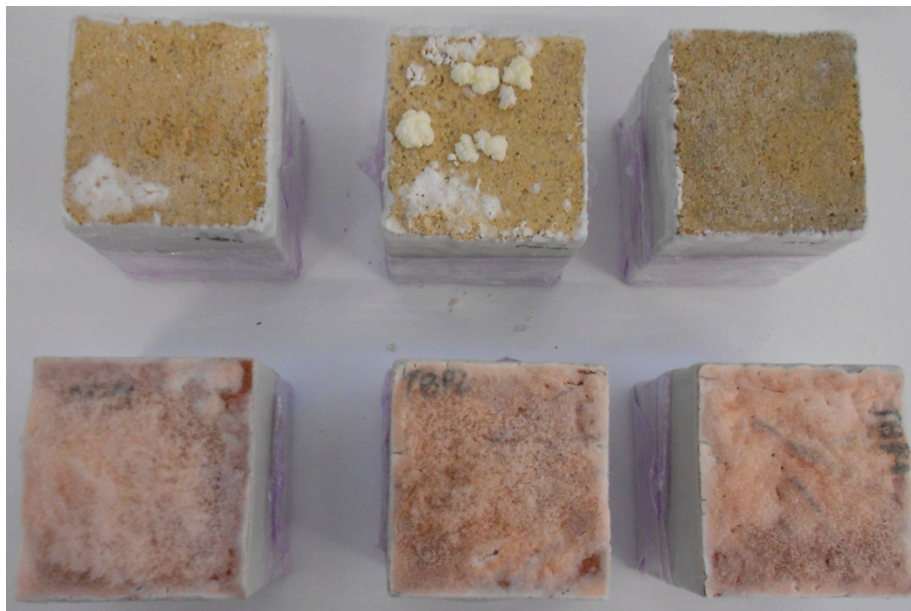
4º dia de secagem:



2ª semana de secagem:

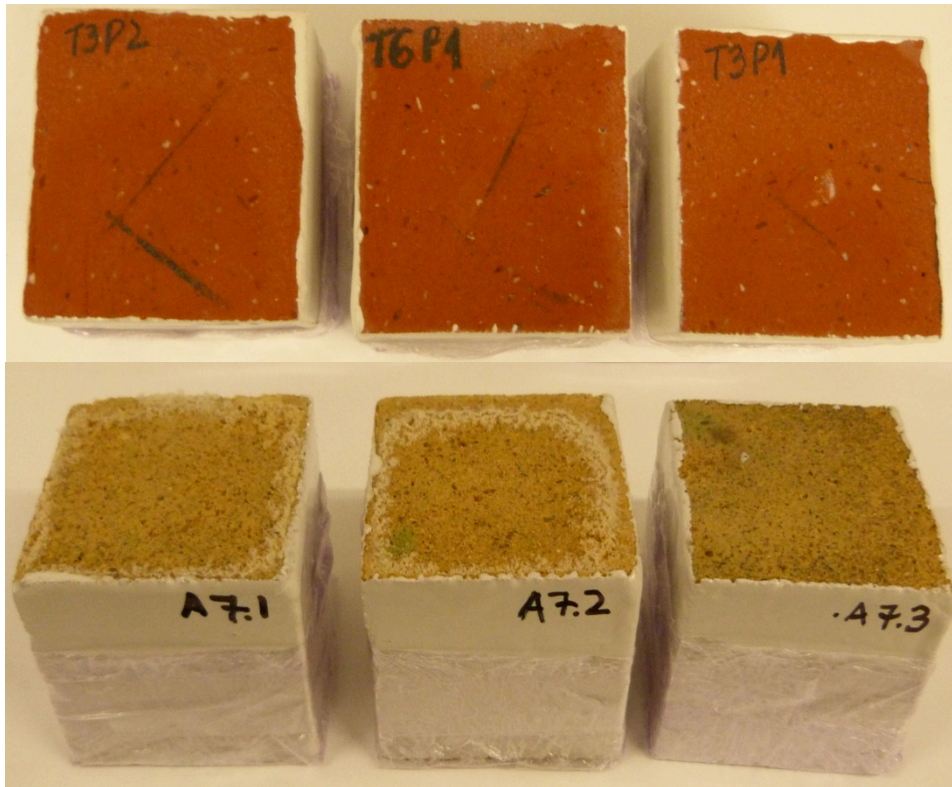


5ª semana de secagem (os provetes mantiveram-se com este aspeto até ao término desta dissertação):

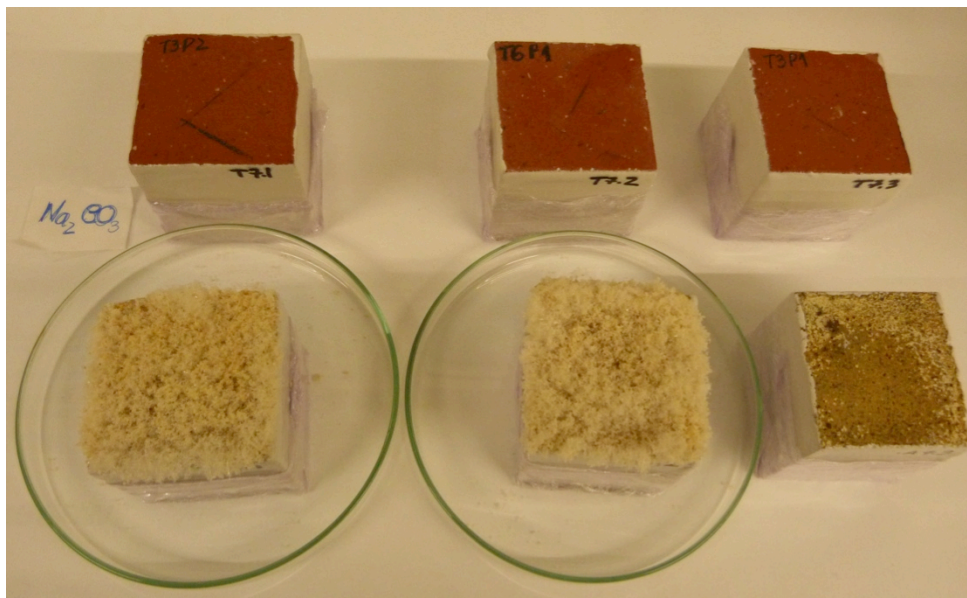


- Carbonato de Sódio:

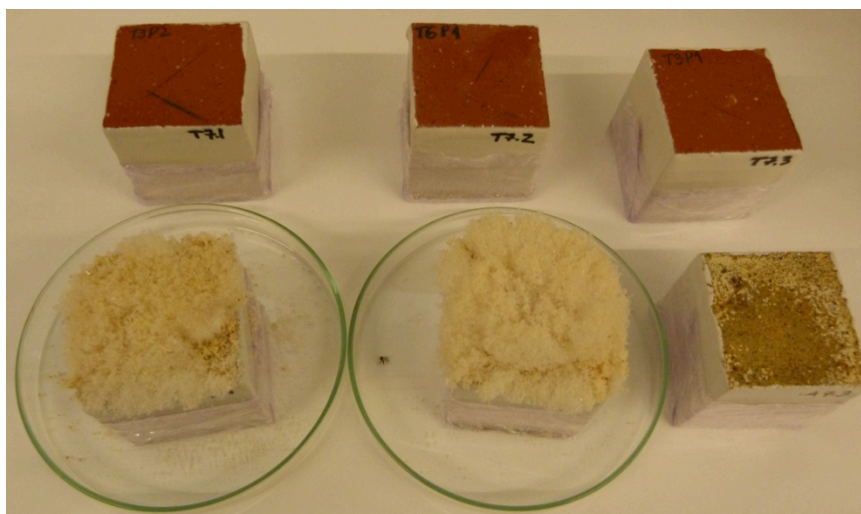
1º dia de secagem:



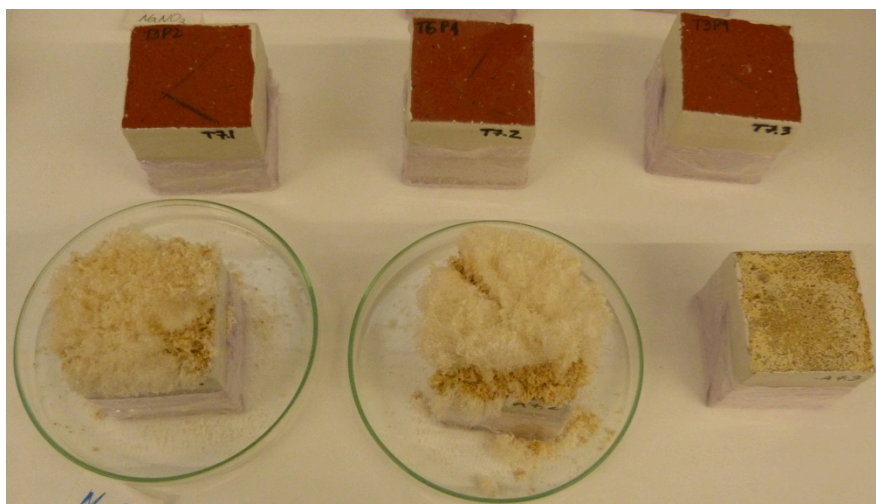
2º dia de secagem:



4º dia de secagem:



2ª semana de secagem:



3ª semana de secagem (os provetes mantiveram-se com este aspeto até ao término desta dissertação):

